

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Restauración y puesta en marcha del antiguo reloj del Ayuntamiento de Iruñea



Grado en Ingeniería
en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

Adrián Claver Alba

Jokin Aginaga

Pamplona, junio de 2019



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a la asociación Yeregui Elkarte, en especial a Xabier Alvarez Yeregui y Begoña Arruti San Martin. Poder realizar este proyecto ha sido una gran oportunidad para mí, en la que he aprendido y disfrutado mucho. Sin olvidarme de Juan Mari, que nos acompañó en los inicios del proyecto y en la visita a Zestoa.

Agradecer a Jokin Aginaga, profesor de la Universidad y director de este trabajo, por darme la oportunidad de trabajar junto a él y por tratar de realizar siempre el mejor proyecto posible.

Agradecer al Planetario por el local y las facilidades mostradas durante la restauración. Mención especial para Nieves Gordón, por trabajar junto a nosotros en las gestiones desde un principio, y a Miguel Ángel Bretos por compartir conmigo sus conocimientos acerca de los relojes.

Agradecer también a las personas que han aportado su granito de arena desinteresadamente para ayudarme con este trabajo. A Rafael López por las fotos y documentos y a relojeros San Martin por aportar sus conocimientos cuando fueron necesarios. A los técnicos de los talleres de la Universidad por fabricar las piezas que necesitábamos. Y como no, a Eduardo, relojero de Alsasua. Gracias por mostrarte siempre dispuesto a ayudarme y enseñarme todo lo que sabes sobre el mundo de los relojes. Tu ayuda nos fue de gran utilidad.

Como suele decirse, lo mejor se deja para el final, y no tengo suficientes líneas para agradecer a las personas que vienen a continuación.

Gracias a Ángel, José Mari, Lourdes, María, Marisa, Máximo, José y Tomas. Realizar este proyecto habría sido imposible sin vosotros. Gracias por todo el trabajo realizado, por vuestra paciencia, vuestros consejos y ayuda y por todo lo que me habéis enseñado en estos meses que he tenido el placer de trabajar junto a todos vosotros.

Por último, dar las gracias a mi familia y amigos. Sin vuestra ayuda y apoyo ni siquiera me habría atrevido a embarcarme en este proyecto. En especial a Ainhoa, por saber sacar mi parte optimista los días menos buenos y a Sandra, por saber aconsejarme desde su experiencia.

Resumen

La asociación Yeregui Elkarte se dedica desde hace unos años a la restauración y puesta en marcha de relojes monumentales. A raíz de una propuesta de dicha asociación al Planetario de Pamplona y, a su vez, una propuesta del Planetario al Departamento de Ingeniería de la Universidad nace el proyecto de restaurar el antiguo reloj del Ayuntamiento de Pamplona.

Los relojes mecánicos son mecanismos de precisión formados por actuadores, levas y engranajes. Así es el reloj del Ayuntamiento de Pamplona, el cual fue retirado de la casa consistorial en 1991 por motivos que se desconocen; bien podría ser por problemas en su funcionamiento o bien por la necesidad de tener que darle cuerda manualmente. Después de estar marcando la hora en su fachada durante más de 150 años, y tras ser guardado en un edificio municipal fue trasladado al Planetario de Pamplona. El reloj ha precisado de un proceso de limpieza, reparación y restauración para volver a ponerlo en marcha y quedar expuesto al público en el propio Planetario.

Para empezar, se desmontó el reloj para poder limpiar y restaurar las piezas que lo precisaran. Se trató de realizar una restauración no invasiva, tratando de mantener el máximo de piezas originales posible, si bien en algún caso ha habido que añadir piezas nuevas. Después, se volvió a montar y, tras realizar las reparaciones y ajustes necesarios, se comprobó que funcionamiento era el adecuado. Dado que el reloj será expuesto, se ha diseñado un sistema para la sonería, con la posibilidad de activarlo y desactivarlo, de modo que pueda estar en funcionamiento cuando sea oportuno.

Por otro lado, se ha realizado un modelo virtual del reloj, tanto de su montaje como de su funcionamiento. De este modo podrá verse de una manera visual y detallada el funcionamiento de este tipo de relojes mecánicos y ayudar así a su divulgación como parte del patrimonio histórico local.

Palabras clave: Reloj monumental de torre, restauración, familia de relojeros Yeregui, legado histórico, reconstrucción virtual.

Laburpena

Yeregui Elkarteak hainbat urte darama erloju monumentalak zaharberritu eta berriro martxan jartzen. Elkarte honek Iruñeko Planetarioari proposatu zion zaharberritzea aurrera eramatea eta hauek Unibertsitateko ingeniari-tza departamenduari. Honela zen Iruñeko Udaletxeko erlojua zaharberritzeko proiektu hau.

Erloju mekanikoak doitasunezko mekanismoak dira, engranajez, espekaz eta eragingailuz osatuak. Halakoa da Iruñeko udaletxean ia 150 urtez ordua eman zuen erloju mekanikoa. 1827. urtean eraiki zuten, Iruñeko udaletxean jarri zuten 20 bat urte beranduago, eta bertan eman zuen ordua 1991n ordezkatu zuten arte. Zergatik kendu zuten ezezaguna da; baina funtzionamendu arazoengatik edo soka eskuz eman behar izateagatik izan daitekeela pentsa daiteke. Ondoren, udal eraikin batean gordeta egon zen, Planetariora eraman zuten arte. Erlojuak zaharberritze eta konponketa prozesu bat behar izan du berriro martxan egoteko eta Planetarioan ikusgai egon ahal izateko.

Lehenik eta behin, erlojua desmuntatu zen, beharrezkoa zen piezak garbitu eta konpontzeko. Zaharberritzean erloju originalean ahalik eta inpaktu gutxien izaten saiatu da, pieza originalak mantenduz posible zen kasuetan. Hala ere, kasu batzuetan pieza berriak gehitzea beharrezkoa izan da. Garbitu ondoren berriz montatu zen, beharrezkoak ziren konponketak egin eta bere funtzionamendua egokia zela ikusi zen. Hau ikusita, beharrezkoak ziren aldaketak egin ziren eta kanpamentzat euskarri eta soinu-jotze sistema berria diseinatu zen. Sistema hau behar denean aktibatze-ko aukera ematen du, nahi denean kanpaiak jo ahal izateko.

Azkenik, erlojuaren berreraikitze birtuala egin da, bere funtzionamendua eta muntaketa ikusi ahal izateko. Honi esker, erloju mekaniko hauen funtzionamendua modu bisual eta zehatz batean ikusteko aukera egongo da, mekanismo lan hauen ondare historiko eta teknologikoa zabalduz.

Hitz-gakoak: Dorre-erloju monumentalak, zaharberritzea, ondare historikoa, Yereguitar erlojugileak, berreraikitze birtuala.

Índice

1.- INTRODUCCIÓN.....	7
2.- ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DEL PROYECTO	8
3.- CONTEXTO HISTÓRICO.....	9
3.1. – Desarrollo histórico de los relojes.....	9
3.2.- Historia de la familia Yeregui.....	13
3.3.- Historia del reloj del Ayuntamiento	15
4.- ELEMENTOS DEL RELOJ Y SU FUNCIONAMIENTO	17
4.1.- Elementos generales	17
4.1.4.- Rueda imperial.....	18
4.1.2 Ruedas reductoras.....	20
4.1.3.- Pesas.....	21
4.2.- Movimiento.....	22
4.2.1.- Rueda de escape.....	22
4.2.2.- Áncora	22
4.2.3.- Mecanismo del péndulo	23
4.2.4.- Rueda minutería	25
4.2.5.- Actuador Y	26
4.2.6.- Resumen funcionamiento mecanismo de movimiento	27
4.3.- Sonería de cuartos.....	27
4.3.1.- Rueda segunda.....	27
4.3.2.- Rueda primera	28
4.3.3.- Actuador de bloqueo.....	29
4.3.4.- Actuadores de sonido	30
4.3.5.- Venterol	31
4.3.6.- Actuador de activación de sonería de horas	32
4.3.7.- Resumen del funcionamiento del mecanismo de la sonería de cuartos	33
4.4.- Sonería de horas.....	34
4.4.1.- Rueda de engrane	34
4.4.2.- Rueda primera	34
4.4.3.- Actuador de bloqueo y rueda segunda	35
4.4.4.- Actuador de sonido	36
4.4.5.- Venterol	36
4.4.6.- Resumen del funcionamiento del mecanismo de la sonería de horas	36
4.5.- Estructura.....	37

RESTAURACIÓN DEL ANTIGUO RELOJ DEL AYUNTAMIENTO DE PAMPLONA

4.5.1.- Base.....	37
4.5.2.- Bastidor.....	37
4.6.- Periodo de oscilación y longitud del péndulo	40
4.7.- Tiempo de funcionamiento	41
5.- FASES DEL PROCESO DE RESTAURACIÓN	43
5.1.- Primera toma de contacto	43
5.2.- Gestión de grupo de trabajo.....	45
5.3.- Prueba de funcionamiento inicial	47
5.4.- Gestiones previas a la restauración	48
5.5.- Desmontaje	49
5.6.- Limpieza y pintado	53
5.7.- Montaje	57
5.7.1.- Movimiento.....	57
5.7.2.- Mecanismos de sonería	58
5.8.- Pruebas y arreglos	64
5.8.1.- Mecanismo de la sonería de cuartos	64
5.8.2.- Venteroles.....	67
5.8.3.- Unión péndulo.....	68
5.8.4.- Nuevo mango para la manivela	68
5.8.4.- Rodamientos.....	69
5.9 Resumen del proceso de restauración.....	70
6.- UBICACIÓN DEFINIDA PARA EL RELOJ	72
6.1.- Elección de ubicación.....	72
6.2. – Longitud real del péndulo	73
7.- DISEÑO DEL SOPORTE PARA LA CAMPANA.....	75
7.1.- Diseño inicial	75
7.2.- Geometría de las piezas	80
7.3.- Factor de seguridad del soporte de la campana	82
7.4.- Fabricación del soporte	83
8.- RECONSTRUCCIÓN VIRTUAL DEL RELOJ.....	87
9.- PRESUPUESTO	93
10.- CONCLUSIONES.....	96
11.- BIBLIOGRAFÍA	99

PLANOS

- P.1 SUJECCIÓN
- P.2 BARRA VERTICAL ESTRUCTURA
- P.3 BARRA HORIZONTAL ESTRUCTURA
- P.4 EJE ACTUADORES
- P.5 ACTUADOR VERTICAL
- P.6 ACTUADOR HORIZONTAL
- P.7 BLOQUE ACTUADORES
- P.8 GANCHO
- P.9 PERFIL
- P.10 SOPORTE SISTEMA DE CAMPANA
- P.11 SOLDADURA PERFILES Y GANCHO
- P.12 SOLDADURA BLOQUES

1.- INTRODUCCIÓN

Este proyecto consiste en la restauración y puesta en marcha de un antiguo reloj monumental de torre. Este reloj fue fabricado en el año 1827 y dio las horas en el Ayuntamiento de Pamplona durante alrededor de 150 años.

El Ayuntamiento realizó una concesión al Planetario de Pamplona y por este motivo en la actualidad el reloj se encuentra en este lugar. La restauración se ha realizado en los talleres del Planetario, donde será expuesto los próximos años; ya que la concesión es para unos 50 años. Para realizar la restauración del reloj el Planetario se puso en contacto con la UPNA y de ahí surgió el presente proyecto.

Para poder llevar a cabo el proceso de restauración se reunió un grupo de voluntarios, ex estudiantes del Aula de la Experiencia de la UPNA, para realizar las labores más artesanales y aportar nuevas ideas gracias a su experiencia.

La presente memoria describe, en primer lugar, el contexto histórico tanto del reloj restaurado como de los relojes en general y de la familia de relojeros Yeregui.

El reloj está formado por un entramado de engranajes, levas y actuadores que forman un mecanismo de un grado de libertad. Obviamente, resulta necesario conocer bien el funcionamiento del complejo mecanismo que forman dichos componentes para poder volver a ponerlo en marcha, por lo que en segundo lugar se describe detalladamente funcionamiento del reloj.

Posteriormente, se describe el proceso de restauración y el diseño de los nuevos componentes que ha sido necesario diseñar. A continuación, se muestra un modelo de CAD del reloj, construido con el objetivo de dar a conocer el reloj y su historia y facilitar la comprensión de su funcionamiento.

Finalmente, se muestra un presupuesto de los gastos de restauración y se presentan las conclusiones de todo el proceso.

2.- ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

El área de conocimiento de la historia de las máquinas y los mecanismos tiene como objetivo analizar y divulgar los trabajos ingenieriles de todas las épocas. Para trabajar el tema, la federación IFToMM (International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science), creó en 1973 la comisión permanente de HMM [1]. En las últimas décadas muchos ingenieros del ámbito académico han trabajado este tema, analizando al detalle el funcionamiento de mecanismos históricos y dando a conocer en el ámbito técnico y cultural el impacto histórico de los trabajos realizados hasta la fecha. Un ejemplo de ello son las restauraciones virtuales de mecanismos históricos [2] y las reales [3], realizadas en muchas Universidades.

Este proyecto nace de una propuesta de la asociación **Yeregui Elkarte**, la cual trabaja para recuperar la memoria histórica de la familia de herreros-relojeros Yeregui. Dicha asociación propuso al Planetario de Pamplona y, a su vez, el Planetario al Departamento de Ingeniería de la UPNA la realización conjunta de esta restauración y tras atar los flecos iniciales nos pusimos a ello mano a mano.

El objetivo principal del proyecto es restaurar y volver a poner en marcha o “dar vida” al antiguo reloj del Ayuntamiento de Pamplona respetando en la medida de lo posible las piezas originales y siendo lo menos invasiva posible. Por otro lado, se ha querido realizar un diseño virtual del reloj que mostrará su despiece y funcionamiento, con la intención de lograr explicar mediante ellos el funcionamiento de este tipo de relojes de una manera didáctica y visual. De esta forma se pretende poner en valor el legado histórico y tecnológico de estos tesoros mecánicos.

3.- CONTEXTO HISTÓRICO

Teniendo en cuenta la antigüedad del reloj restaurado es importante hablar del contexto histórico. De este modo podrá verse que estos mecanismos no eran meras máquinas, sino que, cuentan con una larga historia detrás de ellos.

Los relojes monumentales de torre son tesoros mecánicos que se encuentran en las iglesias y ayuntamientos de todos los pueblos. Son elementos de precisión, formados por engranajes, levas y actuadores, teniendo como fuente de energía la fuerza de la gravedad. Desde que en el siglo XVII se inventó el reloj con péndulo, hasta mediados del siglo XX que fueron inventados los electrónicos, los relojes monumentales de torre marcaron el ritmo de los pueblos y ciudades a lo largo de todo el mundo. En Navarra también ocurrió lo mismo, y un ejemplo claro es la familia de relojes Yeregui, de la cual 5 generaciones se dedicaron a la relojería. La asociación Yeregui Elkartea tiene como objetivo recuperar la historia de estos relojes y poner en valor el legado tecnológico y cultural de los mismos.

Entre los relojes contruidos por esa familia está el del Ayuntamiento de Iruñea, contruido por Juan Manuel Yeregui en 1827. Ese es el reloj que se ha restaurado y puesto en marcha en este proyecto. El reloj residió en la casa consistorial de Pamplona durante aproximadamente 150 años, pero inicialmente estuvo en la iglesia de San Lorenzo de Pamplona. Se desconoce el motivo por el cual, tras unos 20 años en dicha ubicación, fue trasladado al Ayuntamiento. Posteriormente, en 1991, fue trasladado a un local municipal y actualmente se encuentra en el Planetario de Pamplona; donde ha sido restaurado y en cuya Sala de Exposiciones será expuesto los próximos años.

La realización de este proyecto consta de varias partes y es importante ubicar el reloj en la historia antes de comenzar a profundizar en su funcionamiento.

3.1. – Desarrollo histórico de los relojes

Los métodos para medir el tiempo han cambiado mucho a lo largo de los años; desde el día y la noche o los meses hasta los relojes electrónicos de hoy en día. En esta sección se hará un breve repaso a la historia de los relojes, haciendo especial hincapié en los de tipo mecánico.

El reloj de arena, el de sol y la Clepsidra son algunos de los relojes más antiguos que se puede encontrar. Es conocido que el **reloj de sol** empezó a utilizarse a lo largo del siglo XX a.c. en China e India. El funcionamiento de estos relojes consiste en unas varillas que crean una sombra por el efecto de los rayos sol, de este modo puede saberse la hora que es, teniendo una clara dependencia del clima.

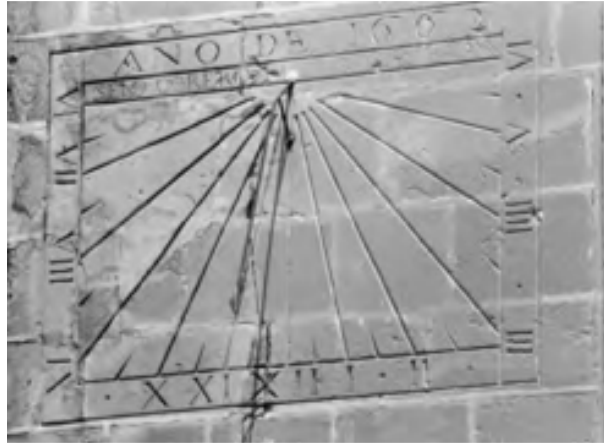


Figura 1. Reloj de sol [4]

El **reloj de arena** es otro de los relojes más conocidos. Su funcionamiento es muy simple; utilizando la energía potencial de la gravedad un flujo de arena cae de un receptáculo de vidrio a otro, midiendo de este modo un determinado intervalo de tiempo. La fluencia de la arena en estos relojes tiene características diferentes a la de los líquidos; siendo el caudal independiente a la altura del material en el depósito hasta los últimos cm [5].



Figura 2. Reloj de arena

La **Clepsidra** es de los tres el reloj menos conocido, pero no por ello menos importante. Estos relojes funcionan con agua, la cual cumple dos funciones en ellos. Por un lado, ejerce la fuerza que mueve al reloj mediante el efecto de la gravedad, y por otro, la velocidad constante que tiene el agua al caer determina el ritmo del reloj.

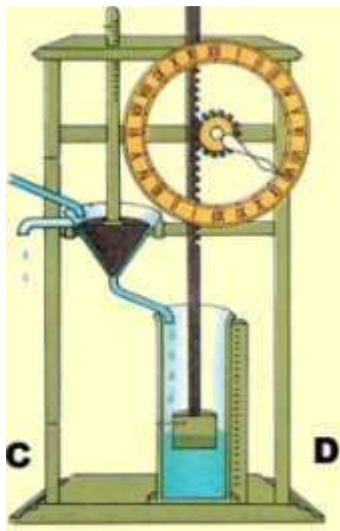


Figura 3. Clepsidra medieval [6].

Cuando se crearon los **relojes mecánicos**, las dos funciones mencionadas en la Clepsidra se separaron. Por un lado, la fuerza necesaria para mover el mecanismo se lograba mediante la fuerza de la gravedad que ejercían las pesas que colgaban del reloj. Por otro lado, para marcar el ritmo o velocidad del reloj, se crearon unos elementos llamados escape. Estos escapes fueron, sin ir más lejos, la llave para el nacimiento de los relojes mecánicos en el siglo XIII [7].

La creación de los primeros relojes mecánicos no está del todo clara; pero podría colocarse entre los siglos XIII y XIV. Los relojes de esa época contaban con un escape formado por un eje y un elemento llamado **foliot**. Aunque estos relojes supusieron un paso adelante muy importante, su precisión estaba limitada por las grandes perturbaciones que sufría el foliot en sus oscilaciones [8]. El Foliot es un regulador de la marcha del reloj que consiste en un escape formado por paletas y una rueda catalina, la cual es una rueda con un dentado paralelo al eje, con la que engrana. Su funcionamiento consistía en mover un travesaño en forma de vaivén mediante las paletas; pudiéndose regular su frecuencia cambiando la posición de 2 contrapesos colocados en sus extremos. Los relojes con este sistema podían llegar a variar la medida de la hora en más de media hora al día [6].

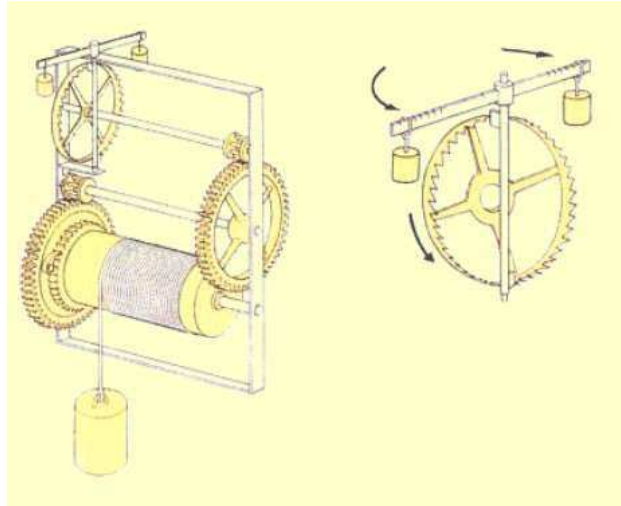


Figura 4. Foliot y escape de paletas [6].

En el año 1656, **Huygens** reemplazó el elemento foliot por un **péndulo** aumentando considerablemente la precisión de los relojes; pasando de errores de medición de horas a errores de minutos. Con la introducción del péndulo, el periodo de funcionamiento del reloj pasó a depender de la ubicación de su centro de gravedad, ya que la frecuencia de oscilación del péndulo depende exclusivamente de la longitud hasta su centro de gravedad y de la aceleración de la gravedad. En un principio se completó utilizando un escape de paletas, pero posteriormente, en 1670, comenzó a utilizarse el escape tipo áncora. Uno de los problemas del péndulo era las variaciones que sufría en su longitud debido a las dilataciones térmicas; pero, este problema se solucionaba utilizando varias varillas de hierro y bronce manteniendo con esta configuración el centro de gravedad del conjunto pendular casi fijo. Gracias al avance que supuso el péndulo empezaron a aparecer los primeros relojes monumentales de torre, como es el ejemplo del antiguo reloj del Ayuntamiento de Pamplona construido por Juan Manuel Yeregui.

Otra de las soluciones al problema de las dilataciones en los péndulos la desarrolló el relojero de Royal Society **George Graham**. Su idea consistía en usar mercurio para hacer frente al problema que había con la dilatación, gracias a que su densidad es casi tres veces mayor que la del latón. De este modo el mercurio se encuentra en un cilindro, al igual que un termómetro, así cuando la longitud del péndulo aumenta el mercurio se expande manteniendo así constante la posición del centro de gravedad del péndulo [9].

Hasta el siglo XVIII viajar en alta mar tenía muchos riesgos. Uno de los mayores problemas surgía en la dificultad que suponía orientarse; ya que, para posicionarse era necesario determinar la **longitud** y la latitud. La latitud podía determinarse mediante la medición de la elevación del sol o la estrella polar utilizando sextantes u otros instrumentos, pero, la longitud no era tan fácil de determinar. Para determinar la longitud era necesario poseer un reloj que midiera el tiempo en el que se elevaba el

sol, y los relojes que había en ese momento no eran capaces de dar una medición precisa en alta mar debido a los cambios de temperatura y las vibraciones.

Para hacer frente a este problema, el gobierno británico propuso un concurso en el que tomo parte **John Harrison**. Este relojero tuvo que realizar 5 prototipos distintos hasta lograr el ideal, y contó inicialmente, en 1730, con la ayuda del reconocido relojero de la época George Graham. El primer prototipo (H1) consistió en una serie de muelles y resortes, y ya este prototipo resulto ser exitoso. Pero Harrison continuó realizando prototipos, probando con dispositivos antifricción y bimetales entre otras cosas. Finalmente, en 1761, realizó la prueba con el prototipo H4, teniendo un gran éxito. Este diseño tenía unas dimensiones mucho más reducidas y funcionaba mediante resortes arrollados en espiral y reguladas por sistemas insensibles al balanceo. Aun y todo, llegó a perfeccionar este diseño realizando el último, conocido como H5. Estas innovaciones en los relojes supusieron un gran avance, no solo para la relojería, sino para toda la tecnología y sociedad de la época.



Figura 5. Relojes de Harrison, de izq. A Drcha. H1-H5 [10].

En la actualidad, la mayoría de los relojes mecánicos han sido reemplazados por relojes electrónicos. Debido al progreso que supusieron las redes eléctricas y no tener que darles cuerda manualmente, resultaron ser más funcionales. Los relojes eléctricos empezaron a crearse en el año 1840, pero necesitaron de unos años para lograr ser más precisos [11].

3.2.- Historia de la familia Yeregui

La historia de los relojeros Yeregui es la historia de 5 generaciones. **José Francisco Yeregui Zabaleta** (1760 – 1834) fue el primer relojero de la familia. Nacido en Leitza, en un principio fue carpintero de profesión, pero la curiosidad por los relojes le empujó a convertirse en herrero y relojero. Tras analizar el reloj de la iglesia de su pueblo, construyó un reloj de madera, el cual daba las horas enteras y las medias.

Con este reloj de madera se presentó en una feria en Iruñea. En ella tuvo mucho éxito y fue animado a realizar uno de hierro. Por este motivo, José Francisco se trasladó de Leitza a Arruitz, para aprender allí el oficio de herrero. Dejo atrás a su familia y pasó dos años en Arruitz, donde le pidieron que construyera un reloj para la iglesia de Betelu. El día 15 de abril de 1796 formalizaron el acuerdo para la realización del reloj mediante una escritura pública. Este reloj tenía una peculiaridad, a las 3 de la tarde debía tocar 33 veces las campanas, para recordar la edad y la muerte de Cristo. Este reloj estuvo en marcha hasta el año 1962.

Juan Manuel (1795 – 1848), hijo de José Francisco, fue el siguiente relojero de la familia. Su trabajo más conocido es **el reloj realizado en 1827**. A pesar de que en un principio estuvo en la iglesia de San Lorenzo de Iruñea, sobre el año 1849 este reloj fue trasladado al Ayuntamiento de Iruñea. Ese reloj es, sin ir más lejos, el que se ha restaurado y del que trata este trabajo.

El siguiente relojero fue **Juan José** (1819 – 1887), sobrino de Juan Manuel. Nacido en 1819, no hay mucha información sobre él, pero es conocido que construyó los relojes de los pueblos de Alzaga y Aurizberri. Su hijo, **Bonifacio** (1850 – 1911), también fue relojero y realizó los relojes de Marcilla, Saldias, Gaintza e Hiriberri. También fueron relojeros los primos de Bonifacio, **Benito** (1843 – 1912) y **Serapio** (1859 – 1926). De Benito se ha contabilizado que construyó hasta 80 relojes, y de Serapio que realizó varios relojes, como son el de Arano, Elizondo, Goizueta o Irún.

El último relojero Yeregui fue **Andrés** (1884 – 1975), hijo de Bonifacio. Andrés realizó los relojes de Izurdiaga, Igoa y Latasa. Según el historiador Juan Garmendia Larrañaga, entre todos los Yeregui construyeron más de 70 relojes [12]. La figura 6 muestra el árbol genealógico de la saga Yeregui.

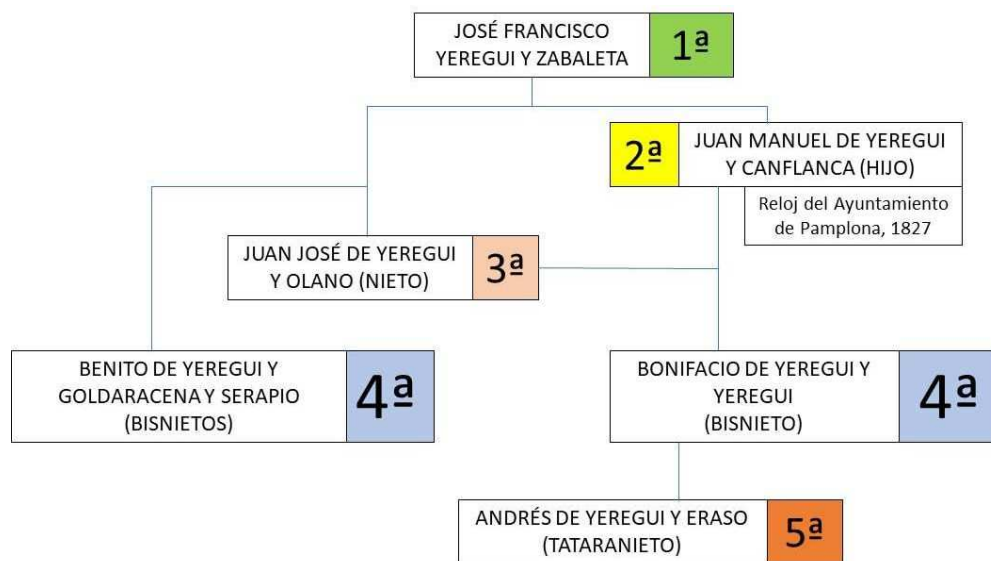


Figura 6. Parte del árbol genealógico de la familia Yeregui [14].

Hoy en día, la asociación Yeregui Elkartea se encarga de recuperar el legado histórico de esta familia de relojeros. Para ello no solo recopilan y difunden la información sobre esta familia y los relojes construidos, también restauran y fomentan la restauración de los relojes monumentales de torre. Gracias a estas restauraciones se puede poner en valor el legado histórico y tecnológico de estos mecanismos y de los artesanos que los construían; facilitando así su divulgación.

3.3.- Historia del reloj del Ayuntamiento

El reloj restaurado en este proyecto dio la hora en el **Ayuntamiento de Iruñea** hasta el año 1991, después de estar en marcha alrededor de 150 años. La fecha exacta de su colocación en el Ayuntamiento es desconocida; pero, gracias a los informes del Ayuntamiento [13] se sabe con exactitud que el **25 de septiembre de 1991** fue retirado de allí. Antes de estar en el Ayuntamiento el reloj dio la hora en la iglesia de San Lorenzo de Pamplona. Se desconoce el motivo por el cual, tras unos 20 años en dicha ubicación, fue trasladado al Ayuntamiento.

Este reloj es uno de los denominados como **reloj monumental de torre**, que funciona mediante un péndulo. La función del **péndulo** es la de marcar el ritmo del reloj; ya que, la longitud del péndulo es a que determina la duración del ciclo de funcionamiento.

La fuente de energía que mueve el reloj es la gravedad; al fin y al cabo, le empuja una pesa, la cual está atada a un cilindro de madera –llamado rueda imperial– mediante una cuerda. Mediante el sistema de engranajes transmite el movimiento uniforme de la pesa al péndulo. Del mismo modo, el tren de engranajes mueve las agujas que dan la hora.

A pesar de que la mayoría de los elementos del reloj están como se fabricaron, algunos elementos fueron cambiado o modificados a lo largo de los arreglos y restauraciones que ha sufrido con el paso de los años. Uno ejemplo claro de ellos son los rodamientos. El reloj, en un principio, tendría cojinetes de bronce; ya que el uso de los rodamientos no se normalizó hasta el siglo XX. De todos modos, los cojinetes iniciales darían problemas o habrían sufrido un excesivo desgaste, y serían reemplazados por rodamientos.



Figura 7. Firma del autor y fecha [14].

Aunque no se tiene información sobre la fecha exacta de colocación del reloj, si hay otra información sobre él. El historiador Juan Garmendia dijo lo siguiente sobre el reloj: "Errementari onen beste erlojuen artean aipatuenetakoak auek ditugu: Iruñako San Lorentzo elizko eta 1849-a ezkerro Iruñeko udaletxean arkitzen dana."

[15]. Según comenta el historiador en 1849 el reloj ya se encontraba en el Ayuntamiento de Pamplona, pero la fecha exacta de colocación sigue siendo un misterio; ya que, no hay información oficial que lo acredite.

4.- ELEMENTOS DEL RELOJ Y SU FUNCIONAMIENTO

El mecanismo del reloj puede dividirse en tres partes teniendo en cuenta su función. La primera parte es la del **movimiento**; esta será la encargada de hacer funcionar el reloj y será la parte en la que se encuentra el péndulo. Las otras dos partes serán las dos sonerías; es decir, el mecanismo de **sonería de cuartos** y el mecanismo de **sonería de horas**. Estas dos tendrán la función de accionar el sonido de las campanas; y a pesar de ser muy similares, cuentan con algunas diferencias que se detallarán más adelante.

4.1.- Elementos generales

Las tres partes cuentan con varios elementos similares, como son el tren de engranajes o las pesas. En la siguiente tabla e imagen se muestra la configuración de cada tren de engranajes y la relación de transmisión para cada parte del mecanismo.

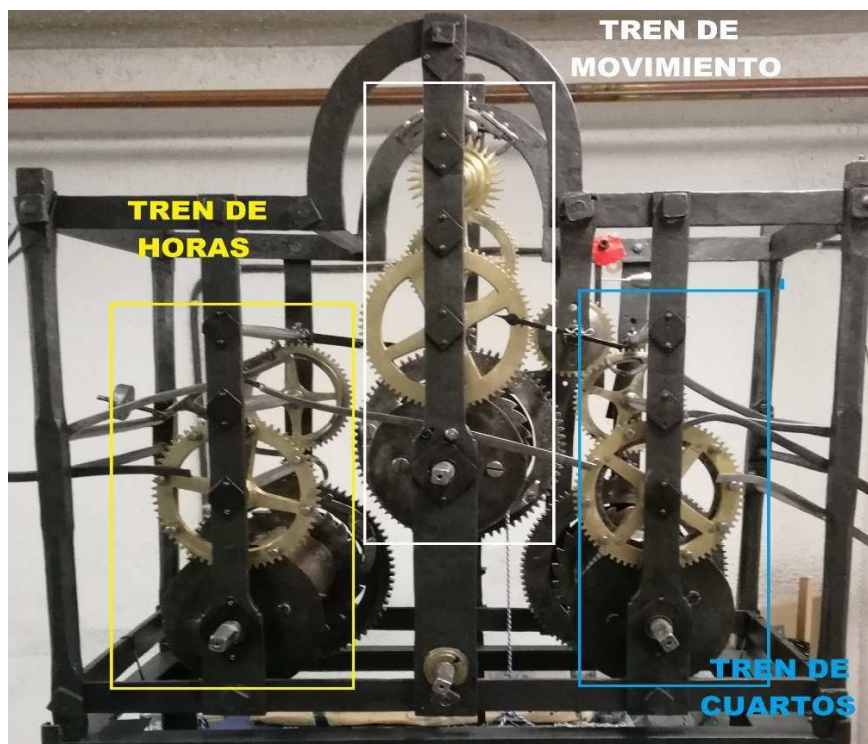


Figura 8. Trenes de engranajes del reloj.

Como puede apreciarse en la imagen anterior, las dos sonerías tendrán un sistema de engranajes prácticamente igual, diferenciándose en el número de dientes de las ruedas y por lo tanto en las relaciones de transmisión. La parte de movimiento por su parte contará con más elementos que las dos anteriores. Esta parte será la encargada de transformar el movimiento rotatorio de las ruedas de su mecanismo en el movimiento oscilatorio y periódico del péndulo. Para ello contará con la rueda de

escape y el áncora; elementos que no se encuentran en los mecanismos de las sonerías.

Las 3 partes están compuestas por una pesa que activa un tren de engranajes que, a su vez, activa otros elementos. El tren de movimiento tiene como salidas el accionamiento del péndulo mediante la rueda de escape, el movimiento de la rueda minutería y la horaria y la liberación de la sonería de cuartos. La sonería de cuartos, a su vez, por un lado transmite el movimiento a los actuadores y por otro libera el mecanismo de sonería de las horas. Finalmente, la sonería de las horas activa los actuadores para hacer sonar las horas.

Mecanismo de movimiento		Mecanismo de horas		Mecanismo de cuartos	
Relación de transmission (i)		Relación de transmission (i)		Relación de transmission (i)	
	504		546		840
Rueda	Z	Rueda	Z	Rueda	Z
Imperial (imp)	80	Imperial (imp)	78	Imperial (imp)	96
Piñon de la imperial (prcimp)	10	Piñon de la imperial (prcimp)	8	Piñon de la imperial (prcimp)	8
Primera (rc1)	72	Primera (rc1)	64	Primera (rc1)	70
1º piñon (prc1)	8	1º piñon (prc1)	8	1º piñon (prc1)	7
Segunda (rc2)	56	Segunda (rc2)	56	Segunda (rc2)	56
2º piñon (prc2)	8	2º piñon (prc2)	8	2º piñon (prc2)	8
Escape (esc)	30				
Minutería (min)	36				

Tabla 1. Relación de transmisión y número de dientes de los engranajes.

4.1.4.- Rueda imperial

Las tres partes del mecanismo cuentan con una rueda imperial. Esta rueda está compuesta por un **tambor de madera**, una **rueda de engrane** y una **rueda trinquete**. El sistema lleva un eje que se introduce en rodamientos situados en la estructura.



Figura 9. Rueda de engrane (Izq.) y componenetes de rueda imperial (Drcha.).

En el tambor se enrolla la cuerda de la que colgará la pesa y, por lo tanto, la rueda de engrane será la primera rueda en transmitir el movimiento al sistema de engranajes. Para dar cuerda al reloj se debe girar el tambor en sentido opuesto al que caerá la pesa. Una pieza clave a la hora de dar cuerda al reloj es la rueda trinquete. Esta rueda gira solidaria al eje y la rueda de engrane, en cambio, gira sobre él. Gracias a esto, es posible darle cuerda al reloj sin cambiar el funcionamiento del mismo; ya que, la rueda de engrane no se moverá. Este sistema cuenta con un **fleque de acero** con la función de muelle y una **uña** que hará de freno. Estos dos elementos hacen que la rueda de engrane gire con la rueda trinquete cuando está funcionando el reloj; pero, no le permite girar cuando se le esté dando cuerda al reloj. La rueda imperial engrana con la rueda primera en cada sistema de engranajes.



Figura 10. Sistema de dar cuerda.

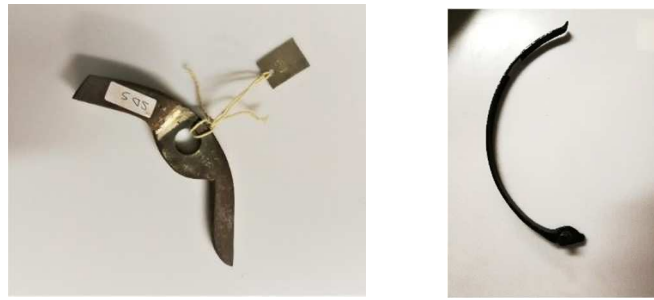


Figura 11. Uña (Izq.) y Fleje (Drcha.).

4.1.2 Ruedas reductoras

El sistema de dar cuerda cuenta también con 2 ruedas que cumplen la función de reductoras. Gracias a estas ruedas se reduce la fuerza necesaria para dar cuerda al reloj, siendo un sistema de engranajes reductor en el cual se disminuye la velocidad aumentando la fuerza ejercida. Una de las ruedas; la más pequeña, se coloca siempre en el mismo eje, y la otra en el eje del tambor al que se le va a **dar cuerda**. Se coloca la manivela en el eje de la rueda pequeña y así se dará cuerda al tambor con mayor facilidad.

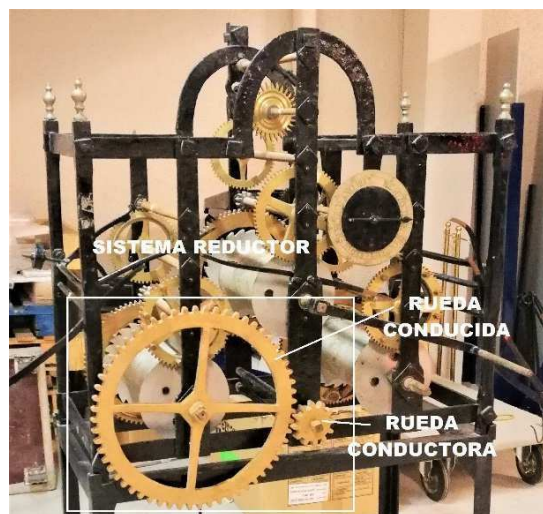


Figura 12. Sistema reductor.

El número de dientes de las ruedas será la clave de la reducción de la fuerza.

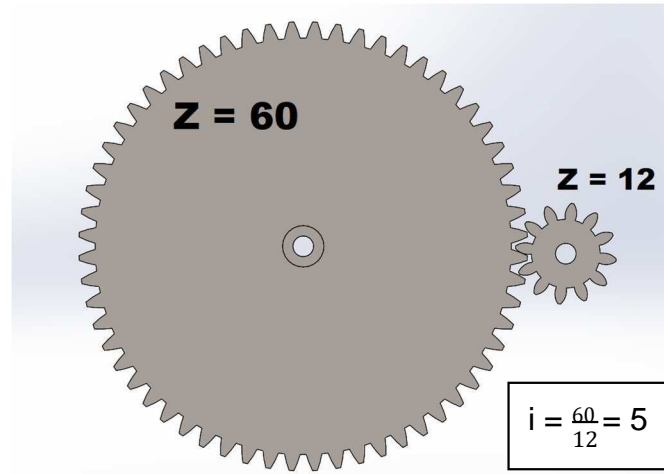


Figura 13. Relación de transmisión del sistema reductor.

Como puede verse en la imagen la relación de transmisión de este sistema será de $i = 5$, con lo que se hará un par 5 veces menor en el momento de dar cuerda.

4.1.3.- Pesas

Otro elemento similar en las tres partes que forman el mecanismo del reloj serán las pesas. Cada mecanismo contará con una pesa que hará moverse a su respectivo tren de engranajes una vez sea puesto en marcha el reloj y desbloqueada cada parte.

Las pesas originales no se encontraban con el reloj y, por lo tanto, se ha tenido que utilizar unas nuevas estimando previamente el valor del peso para cada una de ellas. Estas pesas; colocadas en el tambor de cada rueda imperial, ejercerán una fuerza vertical hacia abajo que accionará el movimiento del tren de engranajes. La fuerza necesaria para mover los trenes de engranajes no será la misma en todos los casos y esto implica que las pesas no tendrán el mismo peso en cada parte. El mecanismo del movimiento deberá mantener el movimiento del péndulo y, además, transmitir el movimiento a la sonería de cuartos mediante la rueda minutería. Esta última deberá accionar el mecanismo de las campanas en dos ocasiones cada vez que suene un cuarto, y también deberá desbloquear y accionar el mecanismo de la sonería de horas. La sonería de horas por su parte solamente deberá accionar el sonido de las campanas una vez por cada hora y por lo tanto será la parte del mecanismo que menos peso requerirá. Tras realizar varias pruebas con distintos pesos, se ajustaron los valores y las pesas con las que funcionará el reloj serán las siguientes:

- **Movimiento:** 100 kg
- **Sonería de cuartos:** 120 kg
- **Sonería de horas:** 60 kg

Es importante asegurar que el peso sea suficiente para accionar y mantener el movimiento de cada mecanismo; pero, no se debe sobrecargar demasiado. Sobrecargar demasiado alguno de los mecanismos supone aumentar las fuerzas que llegan a las ruedas y al sistema de escape, pudiendo llegar a dañarlas. Por eso era importante ajustar bien los pesos para no colocar peso de más ni de menos.

Una vez analizados los elementos similares que puede encontrarse en cada parte del reloj, se explicará detalladamente el funcionamiento del resto de elementos que conforman el mecanismo de cada parte del reloj.

4.2.- Movimiento

En esta parte se encuentran algunas de las piezas más importantes para el correcto funcionamiento del reloj. La transmisión entre la rueda de escape y el áncora será crítica para que el funcionamiento del reloj sea preciso. El péndulo deberá tener un periodo de **$T = 3,8095 \text{ s}$** como se demostrará en el apartado de los cálculos. Para lograr este valor la velocidad del eje de la rueda de escape deberá ser exactamente $\omega_{\text{esc}} = 31.5 \text{ vueltas/h}$; valor que viene determinado por la velocidad de la rueda minuterá, que será de **1 vuelta/hora**.

4.2.1.- Rueda de escape

Se trata de la última del tren de engranajes. A diferencia de las otras ruedas del mecanismo, los dientes de esta rueda no tienen el mismo perfil. El perfil de los dientes de estas ruedas es especial debido al contacto que debe hacer con el áncora para transmitir el movimiento. Por un lado son lisos y por el otro con inclinación y con un total de 30 dientes. La figura 14 muestra la rueda de escape junto con el áncora.



Figura 14. Rueda de escape

4.2.2.- Áncora

Pieza clave para el funcionamiento del reloj y de gran delicadeza debido a su precisión. Este elemento está formado por varios elementos unidos perfectamente para asegurar una geometría exacta. Este escape es del **tipo Graham**. En cada oscilación las dos paletas de sus extremos bloquean la rueda de escape evitando así que se acelere el reloj. Adicionalmente, también se consigue que los intervalos de tiempo a los que avanza la aguja sean iguales, es decir, que sea isócrono. Estos



4.2.3.- Mecanismo del péndulo

Las **varillas** aportan al péndulo la longitud necesaria para que su centro de gravedad esté a la longitud necesaria. Esta longitud está directamente relacionada con el periodo como puede verse más adelante en el cálculo teórico (fórmula 4.8), y, por lo tanto, deberá ajustarse a su valor teórico para asegurar un correcto funcionamiento.

23

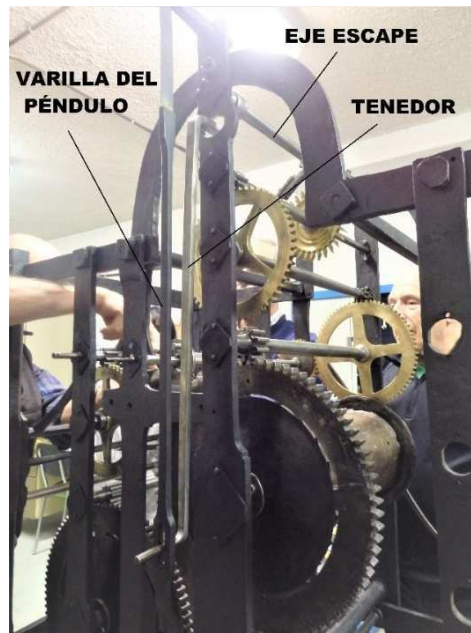


Figura 16. Tenedor

La **pesa** junto con las varillas determinará la posición del centro de gravedad del péndulo. Generalmente se supone el centro de gravedad del péndulo igual al centro de gravedad de la pesa, ya que, su diferencia de peso con respecto a las varillas es considerable. En este caso, el péndulo cuenta con una pesa cilíndrica- tronco cónica de 10 kg, con un saliente en su parte superior preparado para amarrarse a una de las varillas y formar así el péndulo.



Figura 17. Pesa del péndulo.

Cabe destacar que en la época en la que se construyó este reloj las pesas solían ser con forma de lenteja, pero este reloj cuenta con una pesa con forma cilíndrica. Esto puede deberse a que la pesa no sea la original y fuera cambiada en una de las restauraciones que se realizaron del reloj con anterioridad. Pero, al no haber

constancia de este dato, no puede afirmarse a ciencia cierta la originalidad de la pesa actual.

El **amarre del péndulo** con el reloj se lleva a cabo mediante una pieza colocada en la parte superior trasera. Esta pieza atrapa la lámina de 1 mm que se encuentra en el extremo de una de las varillas. Esta lámina tiene cierta flexibilidad para permitir el movimiento del péndulo, pero es suficientemente resistente como para soportar las oscilaciones sin romperse.

4.2.4.- Rueda minuteria

La precisión del reloj vendrá determinada por la velocidad angular de la rueda minuteria. Esta rueda debe dar **una vuelta cada hora** para asegurar que el funcionamiento es correcto y preciso.

Esta rueda tiene 36 dientes y engrana con la rueda primera (tabla 1) que tiene 72 dientes, dando lugar a una relación de transmisión de $i = \frac{Z_{rc1}}{Z_{Nin}} = 2$.



Figura 18. Rueda minuteria

En el otro extremo del eje de esta rueda se encuentra una **rueda pivotada**. La función de esta rueda será la de activar el mecanismo de la sonería de cuartos. Al rotar el eje esta rueda empujará lentamente al actuador Y que se explicará a continuación. Este actuador levantará el primer actuador del sistema de la sonería de cuartos dejando de este modo libre al tren de engranajes del sistema de sonería de cuartos.



Figura 19. Rueda pivotada.

La rueda minuterá cuenta también con un sistema de embrague que permite poner en hora el reloj sin mover el mecanismo. De este modo girando este embrague girará la aguja, pero no afectará al engranaje.

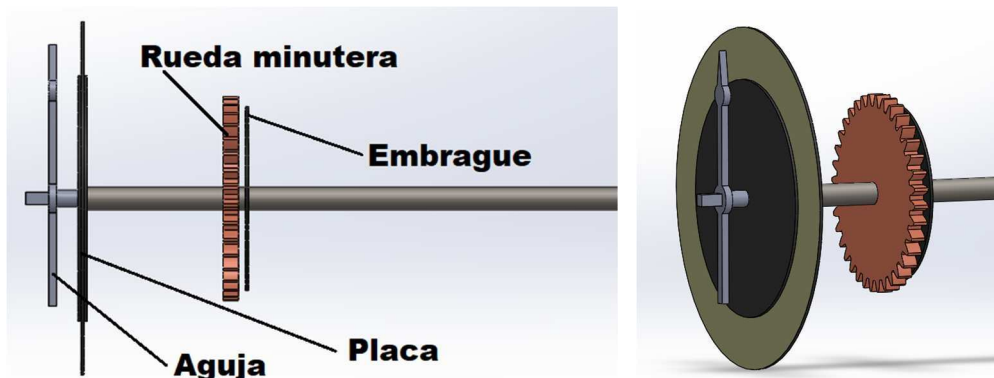


Figura 20. Sistema de embrague de la rueda minuterá.

En el extremo del eje de esta rueda se encuentran la aguja y la placa (fig.7) donde puede leerse la fecha de construcción y la firma del relojero. Esta placa o esfera solamente dará los minutos al contar con una única aguja. Estos relojes solían tener esta esfera en un lado y la esfera principal en otro, donde sí que podían verse horas y minutos; ya que, contaba con dos agujas y un sistema de engranaje para mover ambas.

La placa del reloj es el elemento más importante del reloj si se mira desde un ámbito histórico. En la placa puede leerse la firma del autor y la fecha de fabricación. Gracias a esta información puede asegurarse la originalidad del reloj, su autoría y su fecha. Sin esta placa, el reloj seguiría siendo una maravillosa obra mecánica, pero perdería parte de su valor histórico y se perdería el legado del autor.

4.2.5.- Actuador Y

Este actuador es una de las claves en la transmisión entre la parte de movimiento y la sonería; ya que, su función es la de liberar la sonería de cuartos.



Figura 21. Actuador Y.

La rueda minuterá marcará el movimiento de este actuador; ya que, según gire esta, girará la rueda pivotada que se encuentra en el extremo opuesto de su eje y esta última empujará al actuador Y. Este actuador por su parte irá levantando poco a poco el actuador superior de la sonería de cuartos y, cuando este esté completamente levantado, liberará la rueda segunda del mecanismo de la sonería de cuartos brevemente. Después, el eje de la rueda segunda que cuenta con un pivote quedará bloqueado con el pivote del actuador Y. En este espacio de tiempo la sonería quedará “cargada” a la espera de volver a ser liberada para efectuar el toque de campanas. Al ir avanzando la rueda minuterá el actuador Y seguirá levantándose hasta que pase completamente del pivote con el que está en contacto y vuelva a su posición inicial, liberando el eje de la rueda segunda y permitiendo así el toque de campanas de cuartos.

4.2.6.- Resumen funcionamiento mecanismo de movimiento

Cuando se dé cuerda al mecanismo subiendo la pesa y esta comience a ejercer fuerza hacia abajo, el sistema de engranajes comenzará a moverse lentamente. Las ruedas se transmitirán el movimiento unas a otras hasta llegar a la de escape, con una relación de transmisión de $i = 504$. La rueda de escape será bloqueada por los extremos del áncora y el movimiento rotacional de las ruedas del tren de engranajes será transformado en oscilatorio. El áncora se mueve solidario al mismo eje que el tenedor del péndulo; por lo tanto, al moverse el áncora comenzarán las oscilaciones del péndulo.

La rueda primera engrana también con la rueda minuterá, de modo que esta última mueve la aguja que marcará la hora en la placa del reloj. En el extremo opuesto del eje de la rueda minuterá la rueda pivotada desplazará el actuador en forma de Y hasta que desbloquee el mecanismo de la sonería de cuartos y vuelva a su posición original al realizarse el toque de campanas.

4.3.- Sonería de cuartos

Como se acaba de ver esta será la primera de las sonerías en ser activada y por lo tanto en las próximas líneas se explicará su funcionamiento y se describirán sus elementos.

4.3.1.- Rueda segunda

La rueda segunda cuenta con un **fleje** en su parte interior que servirá para bloquear o dejar moverse al mecanismo. Este fleje quedará bloqueado mediante el actuador de bloqueo (actuador superior de la sonería de cuartos) y cuando sea liberado permitirá el movimiento de la rueda.

Por otro lado, el eje del piñón de la rueda segunda cuenta con un **pivote** que bloqueará de nuevo esta rueda mediante el contacto con el pivote del actuador Y (fig.22).



Figura 22. Bloqueos de la sonería de cuartos.

4.3.2.- Rueda primera

La rueda primera cuenta con dos elementos que condicionarán el toque de las campanas.

Por un lado, se encuentran **los pivotes**. La rueda tiene 10 pivotes, 9 de la misma longitud y uno ligeramente más largo, todos ellos en el lado delantero y con la misma separación (fig.23). Estos pivotes serán los encargados de mover los actuadores que transmiten el movimiento a los martillos que golpearán a la campana. El pivote de mayor longitud tendrá otra función más a parte de la de mover estos actuadores. Este pivote desbloqueará la sonería de horas mediante el actuador de activación de la sonería de horas, cuyo funcionamiento se explicará más adelante.



Figura 23. Rueda primera y pivote de mayor longitud.

En el lado opuesto de la rueda se encuentra una pieza denominada como **caracola**. Esta pieza cuenta con 3 escalones que determinarán el intervalo de tiempo que estará desbloqueado el mecanismo para efectuar los toques de campana. Los intervalos de tiempo serán 4, uno para cada toque de campanas siendo el escalón de mayor recorrido el de en punto (4 toques de campana), el segundo de mayor recorrido el de menos cuarto (3 toques) y el de menos recorrido el de y media (2 toques). El

intervalo de tiempo del primer cuarto de hora lo determinará el hueco que queda entre el último y el primer escalón.



Figura 24. Caracola de la rueda primera.

4.3.3.- Actuador de bloqueo

Este actuador es el superior de los tres actuadores del mecanismo de la sonería de cuartos y su función será la de bloquear el mecanismo o dejarlo moverse en función de su posición.

En la **posición de bloqueo**, el actuador encajará en el fleje de la rueda segunda evitando que esta se mueva y bloqueando así el movimiento de todo el mecanismo de cuartos. Una vez que el actuador Y levanta este otro actuador, la rueda segunda quedará liberada hasta que el pivote de su eje se bloquee con el del actuador Y. Mientras que el pivote está bloqueado este actuador estará levantado a la espera de volver a bloquear el mecanismo. Cuando la rueda vuelve a quedar desbloqueada para que suenen las campanadas, este actuador se mantendrá levantado el periodo de tiempo necesario para que suenen las campanas. Este intervalo de tiempo vendrá determinado por la caracola de la rueda primera, que mantendrá levantado este actuador. Una vez finalizado el toque de campanas, el actuador volverá a caer bloqueando de nuevo la rueda segunda y de este modo bloqueando también todo el mecanismo de la sonería de cuartos.



Figura 25. Posición de bloqueo (Izq.) y de desbloqueo (Dcha.).

4.3.4.- Actuadores de sonido

Esta parte del reloj cuenta con **3 actuadores**, todos ellos ubicados en la parte derecha del reloj, colocados entre las mismas barras unos encima de otros. La función del primero de ellos, el superior, se ha explicado en las líneas anteriores. Los otros dos actuadores son los encargados de mover los martillos que golpearán la campana y su funcionamiento se explicará a continuación.

El movimiento de estos actuadores será determinado por los pivotes que tiene la rueda primera de esta sonería. Esta rueda cuenta con **10 pivotes**; 9 de igual tamaño y 1 ligeramente más largo. El toque de campanas para los cuartos será de dos golpes para cada cuarto, por eso se cuenta con 10 pivotes. A y cuarto 1 pivote levantará los actuadores para llevar a cabo los dos golpes correspondientes con esta hora (uno por cada actuador), a y media 2, 3 a menos cuarto y 4 una vez se llegue a la hora completa.



Figura 26. Actuadores de sonido.

Los pivotes levantarán el extremo del actuador con el que contactan cargando así el golpeo del martillo y al pasar completamente el pivote, el actuador caerá y el martillo efectuará el golpeo de campana.

En el extremo opuesto al que hace contacto con los pivotes se encontrará el agujero que será la conexión con los martillos. Esta conexión se hará mediante cadenas. La figura 27 muestra los actuadores unidos a la estructura del reloj mediante gomas, en una imagen anterior al montaje de la campana que se describirá en la sección 7.

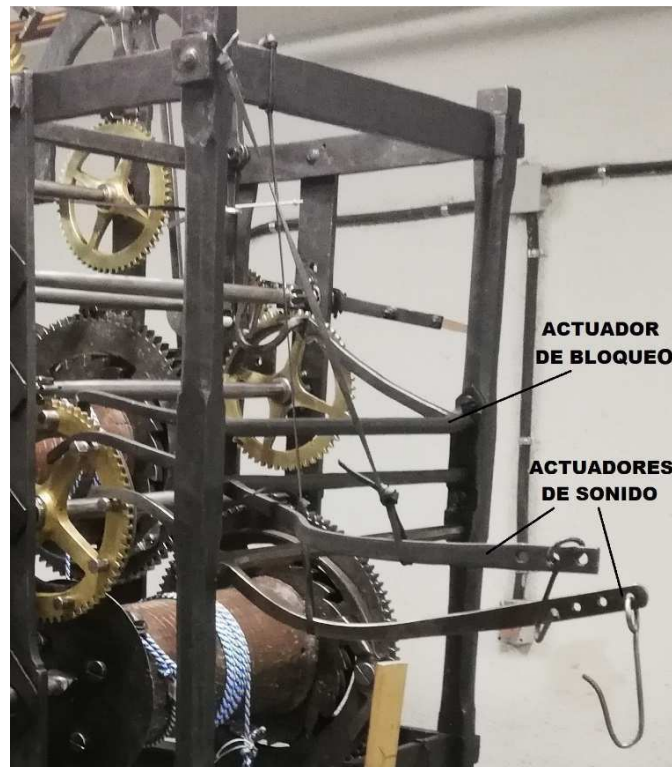


Figura 27. Actuadores de la sonería de cuartos.

4.3.5.- Venterol

El venterol es una pieza que funcionará como **volante de inercia**. Está colocado en uno de los extremos del eje de la rueda segunda, en el lado del péndulo.

El venterol evitará que el mecanismo se acelere en exceso; ya que, absorbe parte de la energía del tren de engranajes. Cuando el mecanismo se desbloquee para tocar las campanas será cuando absorba parte de esa energía evitando **sobre aceleraciones** y al parar el mecanismo y volver a quedar bloqueado evita que el frenazo sea demasiado brusco.



Figura 28. Venterol.

Como puede apreciarse en la figura 28 estos elementos están formados por varias piezas. Las dos paletas unidas a las dos barras que a su vez se unen al eje forman una pieza que funciona a la perfección como volante de inercia. El eje cuenta con dos pequeños agujeros para pasadores que se introducirán una vez se haya colocado esta pieza en el eje. Las dos barras pueden girar sobre el eje, así cuando el eje del tren de engranajes se bloquee, las barras y las paletas podrán liberar la energía almacenada siguiendo girando hasta frenarse por completo.

4.3.6.- Actuador de activación de sonería de horas

La transmisión del movimiento entre las sonerías se llevará a cabo mediante este actuador. Este actuador se encuentra en la barra central delantera de la estructura, en la misma que van colocados los ejes de las ruedas de movimiento.

La activación del mecanismo de horas dependerá del de cuartos; ya que, este último activará el de las horas una vez haya dado todos los toques de campana de los cuartos.

Como se ha comentado anteriormente, uno de los 10 pivotes es de mayor longitud que los demás. Este pivote será el encargado de levantar este actuador que a su vez levantará otro actuador colocado en la parte de la sonería de horas. Al levantarse el mecanismo de horas quedará desbloqueado y volverá a quedar bloqueado al finalizar con el toque de las horas que corresponda.



Figura 29. Actuador de activación de la sonería de horas.



Figura 30. Sistema completo de la activación de la sonería de horas.

4.3.7.- Resumen del funcionamiento del mecanismo de la sonería de cuartos

El funcionamiento de esta parte del reloj podría resumirse en dos fases:

- En la primera fase, el actuador con forma de Y, empujado por la rueda pivotada del eje de la rueda minuterá, empuja al de bloqueo para que este supere al fleje de acero y al escalón de la caracola de la rueda primera y se coloque sobre él, dejando **desbloqueada** a la rueda segunda. Una vez esté arriba, la rueda segunda girará hasta que el pivote de su eje se bloquee con el del actuador en forma de Y; quedando de este modo bloqueado de nuevo el mecanismo. Esta fase es una especie de **fase de carga** del toque de campanas de cuartos.
- En la segunda fase la rueda pivotada continuará girando de modo que el actuador Y, una vez supere del todo al pivote que le está empujando, volverá a su posición inicial. Al volver, el pivote del eje de la rueda segunda queda liberado, dejando libre de este modo todo el mecanismo. Al moverse el mecanismo los pivotes de la rueda primera moverán los actuadores de golpeo de campanas y estos a su vez las mazas que **golpearán a la campana**. Una vez haya tocado todas las campanadas, el actuador de bloqueo caerá en el hueco de la caracola y se volverá a bloquear contra el fleje de acero, quedando así de nuevo bloqueado el mecanismo.

4.4.- Sonería de horas

La última parte del reloj en ser activada es la de horas. Su funcionamiento es similar al de la parte de la sonería de cuartos.

4.4.1.- Rueda de engrane

La rueda de engrane cuenta con una **caracola** similar a la de la rueda primera de la sonería de cuartos. En este caso la caracola tiene **11 escalones** para diferenciar los distintos 12 intervalos de tiempo para los toques de campana de las distintas horas.

El escalón de mayor recorrido será el del intervalo de tiempo de las 12 campanadas, el segundo de mayor recorrido el de 11 campanadas y así sucesivamente hasta las 2 campanadas. El intervalo de 1 campanada será el del hueco entre el escalón de mayor recorrido y el de menor.



Figura 31. Caracola de la rueda de engrane de horas.

El actuador del sonido estará en el escalón durante los toques de campana y en reposo en los huecos mientras el mecanismo esté bloqueado.

4.4.2.- Rueda primera

La rueda primera cuenta con **8 pivotes** encargados del movimiento del actuador que transmiten el movimiento a los martillos que golpearán la campana. En este caso todos serán de igual longitud y su funcionamiento será el mismo que en el caso de la rueda primera de la sonería de cuartos.



Figura 32. Rueda primera desmontada (Izq.) y montada (Drcha.).

4.4.3.- Actuador de bloqueo y rueda segunda

La sonería de horas cuenta con dos actuadores, colocados de la misma manera que los de cuartos, pero en el lado opuesto. El actuador superior será el encargado del bloqueo y accionamiento del mecanismo.



Figura 33. Sonería de horas en posición de bloqueo.

Este actuador bloqueará el mecanismo de la sonería de horas hasta que el actuador de desbloqueo de la sonería de horas lo levante para que comience el movimiento del sistema de engranajes.

El bloqueo se lleva a cabo mediante un **fleje** (fig.34) colocado en la rueda segunda que funcionará del mismo modo que el de la sonería de cuartos.



Figura 34. Fleje de la rueda segunda.

Una vez realizados los toques de campana, el actuador volverá a la posición inicial gracias a un contrapeso colocado en la dirección opuesta y de este modo el mecanismo quedará bloqueado a la espera de que pase una hora para volver a realizar el toque de campanas.

4.4.4.- Actuador de sonido

El funcionamiento de este actuador es el mismo que el de los correspondientes a la sonería de cuartos; con la diferencia de que en este caso solamente habrá 1 actuador. Esto es así debido a que para las campanadas de horas se toca 1 sola vez la campana por cada hora.



Figura 35. Actuador de sonido de la sonería de horas.

Al igual que en la sonería de cuartos; como se ha comentado anteriormente, la rueda primera dispone de unos pivotes que serán los encargados del movimiento de este actuador para mover el martillo que golpeará la campana.

Los pivotes levantarán el extremo del actuador con el que contactan cargando así el golpeo del martillo y al pasar completamente el pivote, el actuador caerá y el martillo efectuará el golpeo de campana.

En el extremo opuesto al que hace contacto con los pivotes se encontrará la conexión con los martillos. Esta conexión se hará mediante cadenas.

4.4.5.- Venterol

Esta pieza tendrá la misma función que en el caso del mecanismo de cuartos y estará colocada en el extremo del eje de la rueda segunda.

4.4.6.- Resumen del funcionamiento del mecanismo de la sonería de horas

El funcionamiento de esta parte es más sencillo que los otros dos. El actuador de desbloqueo de la sonería de horas levantará el actuador superior y este superará el fleje de acero y subirá al escalón de la caracola que le corresponde, quedando así desbloqueado el mecanismo. Los pivotes moverán el actuador de golpeo de la campana, que moverá a su vez las mazas que golpearán la campana. Cuando acabe de dar todas las campanadas el actuador caerá al siguiente hueco de la caracola y volverá a quedar bloqueado contra el fleje a la espera de volver a ser desbloqueado en una hora.

4.5.- Estructura

La estructura del reloj está dividida en dos partes. Por un lado, se encuentra la **base** del reloj, que dota al reloj de una mayor altura. Por otro lado, se encuentra el **bastidor**. La función del bastidor es puramente ornamental y estructural.

4.5.1.- Base

La base está formada por cuatro patas con forma de perfil en L, unidas entre si superiormente con **barras** de la misma forma y reforzadas con **chapas** largas de hierro por debajo. Las patas cuentan con una apertura lateral que les aporta consistencia y estabilidad y en la parte superior tiene unos salientes para hacer tope con el bastidor, que irá sobre la base.



Figura 36. Base del reloj.

4.5.2.- Bastidor

El bastidor está formado por **barras** de sección **rectangular** y otras de sección **cuadrada**. Cuatro de las barras de sección cuadrada son las piezas que se colocan en las esquinas, y que irán apoyadas sobre la base. Las barras de sección rectangular se colocan verticalmente y se unen entre si mediante las barras de sección cuadrada que se colocan horizontalmente. En la parte superior se encuentran unas barras con forma circular en el centro y rectas a los extremos. Estas piezas van unidas a las verticales y en ellas va colocado el eje del áncora.

Las **barras verticales** tienen varios agujeros donde van colocados los rodamientos y en estos rodamientos van los ejes de las ruedas del sistema de engranajes. Las barras que apoyan en la base también cuentan con varios agujeros, pero, en este caso de menor tamaño y con distinta función. Estos agujeros acogerán los ejes de los actuadores de las sonerías.

Una de las barras horizontales cuenta con una peculiaridad; ya que, tiene un saliente donde irá alojado el actuador con forma de Y.



Figura 37. Bastidor del reloj desmontado sin barras centrales.



Figura 38. Bastidor en el proceso de desmontaje.

Los agujeros para los rodamientos no son perfectamente circulares. Todos ellos tienen un **plano** en una zona de la sección, al igual que los rodamientos, y de este modo encajan a la perfección. Una vez están introducidos los rodamientos y los ejes, hay unas tapas con forma de rombo que se atornillan a las barras verticales para tapar y proteger los rodamientos.

Para facilitar el montaje y desmontaje, ambas sonerías cuentan con una pieza en la que encajan los ejes de los actuadores que es independiente a la estructura. Esta pieza se coloca en uno de los lados de los ejes de los actuadores y

posteriormente esta pieza se atornilla a la estructura. De este modo, es más sencillo poner y quitar estos actuadores sin la necesidad de desmontar toda la estructura.

Una de las peculiaridades de las barras cuadradas es que encajan en las verticales con una sección cuadrada, pero luego tienen una parte cilíndrica para atornillar las tuercas en ellas. Gracias a esto, las barras quedan perfectamente unidas entre ellas.

Otro detalle de esta estructura es que las barras cuadradas de las esquinas llevan unos detalles en las puntas. Siendo su función meramente estética, aportan al reloj un aire de elegancia.

Al restaurar el reloj se comprobó que la estructura tenía varias capas de pintura. Se pudo comprobar que anteriormente estuvo pintado de gris y verde; ya que, al lijarla aparecieron zonas con pintura de estos colores. El color verde puede ser en honor al Ayuntamiento de Pamplona, donde dio la hora hasta el 1991, ya que este es el color característico de la bandera de Pamplona. Antes de realizar la restauración, el reloj estaba pintado de negro y por lo tanto se decidió mantenerlo del mismo color. Para ello, una vez lijada toda la estructura, se le aplicó una capa de pintura negro forja.



Figura 39. Barras del bastidor desmontadas.



Figura 40. Detalles de los distintos colores en las barras lijadas.

4.6.- Periodo de oscilación y longitud del péndulo

Como ya se ha comentado anteriormente, los relojes con péndulo fueron un gran avance en la precisión a la hora de medir el tiempo; ya que, las **oscilaciones** del **péndulo** determinan el ritmo del reloj. El parámetro que establece la precisión del reloj es la longitud del péndulo; es decir, la posición del centro de gravedad del péndulo respecto a la articulación. De todos modos, las dilataciones que sufre un péndulo metálico aumentan su longitud, bajando así la posición de su **centro de gravedad**. Esto hará variar el ciclo del tiempo, el periodo para ser más exactos, reduciendo así la precisión al dar la hora.

En el caso del antiguo reloj del Ayuntamiento de Iruñea, se han calculado su tiempo de ciclo y la longitud del péndulo correspondiente. Lo primero es conocer la distribución de las ruedas de engrane del apartado del movimiento y su número de dientes.

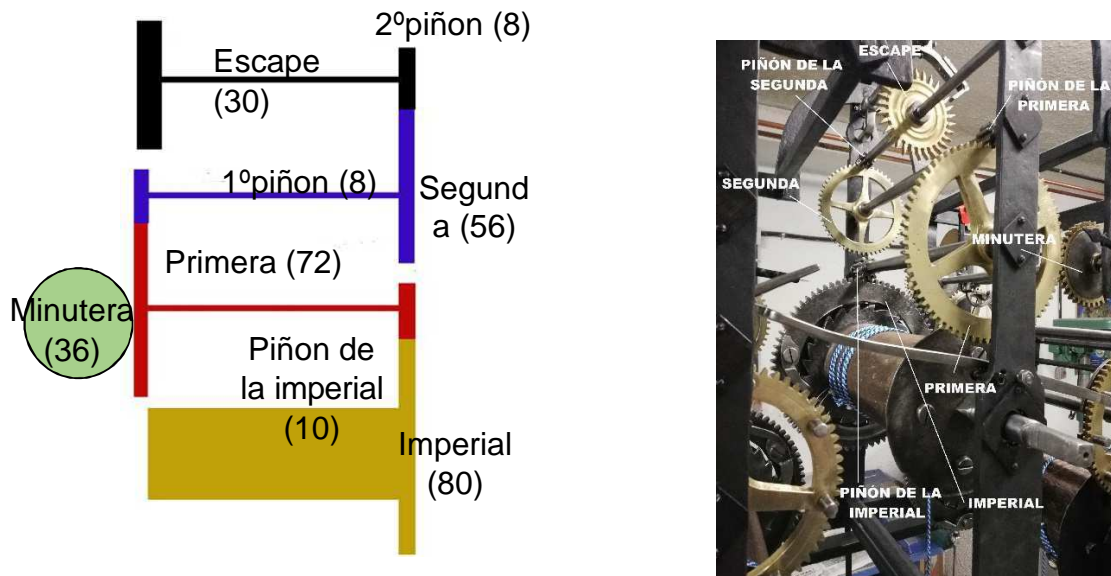


Figura 41. Esquema (Izq.) y foto (Dcha.) del tren de engranajes de movimiento.

Para conocer la longitud teórica del péndulo, se tiene que calcular la velocidad angular teórica de la rueda **minutera**. Para que el funcionamiento del reloj sea correcto, esa rueda deberá dar una vuelta completa cada hora:

$$\omega_{\min} = 1 \text{ vuelta/h} \quad (4.1)$$

Donde el subíndice “min” hace referencia a la rueda minuta.

Partiendo de este dato se puede obtener la longitud teórica del péndulo. Para ello, se aplicará la relación entre el número de dientes y la velocidad angular al

tren de engranajes y se logrará calcular la velocidad de la **rueda de escape**. La relación entre el número de dientes y la velocidad angular es la siguiente:

$$\omega_1 \cdot Z_1 = \omega_2 \cdot Z_2 \quad (4.2)$$

Aplicando esta fórmula a las distintas ruedas del tren que engranan entre sí se obtiene lo siguiente:

$$\omega_{\min} \times Z_{\min} = \omega_{rc1} \times Z_{rc1} \rightarrow 1 \text{ vuelta/h} \times 36 = \omega_{rc1} \times 72 \rightarrow \omega_{rc1} = 0,5 \text{ vueltas/h} \quad (4.3)$$

Para calcular la relación de transmisión entre el eje de entrada y el de salida se utilizará la fórmula de los trenes de engranajes compuestos entre la rueda primera y el segundo piñón:

$$i = \frac{m_{sale}}{m_{entra}} = \frac{m_{prc2}}{m_{rc1}} = \frac{\pi Z_{entrada}}{\pi Z_{salida}} = \frac{(Z_{rc1} \cdot Z_{rc2})}{(Z_{prc1} \cdot Z_{prc2})} = \frac{72 \cdot 56}{8 \cdot 8} = 63 \quad (4.4)$$

Con esa **relación de transmisión** se calcula la velocidad de la rueda de escape:

$$\omega_{esc} = \omega_{prc2} = \omega_{rc1} \cdot i = 0,5 \cdot 63 = 31,5 \text{ vueltas/h} \quad (4.5)$$

Como para cada diente se tiene una oscilación, el **número de oscilaciones** (n_{pend}) que habrá que dar en una hora se calcula de la siguiente manera:

$$n_{pend} = \omega_{esc} \cdot Z_{esc} = 31,5 \text{ vueltas/h} \cdot 30 \text{ dientes/vuelta} = 945 \text{ dientes/vuelta} = 945 \text{ oscilaciones/h} = 0,2625 \text{ oscilaciones/s} \quad (4.6)$$

Por último, se calcula el **periodo** de una oscilación:

$$T = 1/n_{pend} = 3,8095 \text{ s.} \quad (4.7)$$

La longitud del péndulo puede relacionarse directamente con el periodo; de modo que, aplicando esa fórmula al periodo recientemente obtenido, puede calcularse la longitud de péndulo necesaria:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \text{ y } \omega_n = \sqrt{\frac{g}{L}} \rightarrow \text{despejando } L \rightarrow L = 3,6 \text{ m} \quad (4.8)$$

4.7.- Tiempo de funcionamiento

Otra medida importante que habrá que conocer es cuánto tiempo podrá estar en marcha el reloj. Este valor vendrá determinado por la **longitud de caída** de la pesa de movimiento; es decir, por la distancia que habrá desde la pesa hasta el suelo.

Para realizar el cálculo primero habrá que determinar cuál es la velocidad del **tambor de movimiento** del cual cuelga la pesa de movimiento (ω_{TM}). Para

ello se utilizará la misma relación de número de dientes y velocidad angular que se ha utilizado en el punto anterior:

$$\omega_{\text{Primp}} \times 10 = \omega_{\text{TM}} \times 80 \rightarrow \omega_{\text{TM}} = 0,0869 \text{ vueltas/h} \quad (4.9)$$

Ahora se calculará a cuantos metros por vuelta corresponde el dato anterior:

$$L = 2\pi R_{\text{TM}} = 2 \cdot \pi \cdot 95 \text{ mm} = 596,9 \text{ mm} = 0,597 \text{ m/vuelta} \quad (4.10)$$

$$0,597 \text{ m/vuelta} \times 0,0869 \text{ vueltas/hora} = 0,05187 \text{ m/h} \quad (4.11)$$

Por último, sabiendo la longitud que hay desde la pesa hasta el suelo (h) se calculará el tiempo de funcionamiento:

$$\frac{h}{0,05187} = t_{\text{funcionamiento}} \quad (4.12)$$

El tiempo de funcionamiento del reloj dependerá de la altura de caída de las pesas como puede verse en la última expresión. En nuestro caso este tiempo lo definirán las pesas que se usen, pero será cercano a 650 mm, por lo tanto el reloj funcionará sin necesitar que se le dé cuerda alrededor de **12,53 horas**.

5.- FASES DEL PROCESO DE RESTAURACIÓN

En el siguiente capítulo se relata el proceso de restauración del reloj; pasando por las distintas fases, ajustándose lo máximo posible al orden cronológico de los hechos.

5.1.- Primera toma de contacto

La primera fase del proyecto consistió en una toma de contacto tanto con el reloj a restaurar como con la historia de la familia de relojeros Yeregui.

Con la ayuda de proyectos anteriores realizados por alumnos de otras universidades [18,19] junto a la asociación Yeregui Elkartea y la ayuda del propio Xabier Alvarez, comenzamos a estudiar los componentes y el funcionamiento de los relojes monumentales de torre para poder profundizar después en el nuestro en concreto.

Una vez realizado este estudio previo procedimos a realizar la primera toma de contacto con el reloj. De este modo, a finales de mayo, acudí al Planetario junto a Jokin Aginaga, profesor director de este proyecto, para ver por primera vez el reloj.



Figura 42. Reloj antes de ser restaurado.

En esta primera visita nos limitamos a analizar con detenimiento el reloj, realizar las fotografías oportunas para poder seguir estudiando su funcionamiento y a tomar las primeras medidas para el diseño virtual.

Después de esta primera visita continué visitando el reloj, ubicado en ese entonces en el almacén del Planetario, para **tomar** todas las **medidas** y poder realizar el diseño posterior mediante el software informático "Solid Works". Mientras tanto continué realizando reuniones con Jokin para determinar algunas cuestiones que debíamos concretar.

Uno de los primeros retos con el que nos encontramos fue la tarea de buscar un grupo de trabajo dispuesto a realizar este trabajo de manera voluntaria, ya que, el presupuesto para este proyecto en un principio era desconocido; y hasta en el mejor de los casos nos sería imposible pagar a un grupo de trabajo durante los meses de duración del proyecto.

Este problema se resolvió de manera eficaz mediante un anuncio en el **Aula de la Experiencia** de la Universidad Pública de Navarra solicitando voluntarios para la restauración del reloj. Varias personas respondieron al anuncio y de este modo pudimos comenzar a confeccionar el grupo de trabajo que finalmente trabajaría en la restauración y puesta en marcha del reloj. A parte de estas personas varias personas ajenas a la Universidad se interesaron en el proyecto y por tanto nos pusimos en contacto con ellos también.

En este grupo nos pudimos encontrar una gran variedad de profesionales en distintas materias con una larga experiencia laboral; desde especializados en trabajos mecánicos y eléctricos o delineantes hasta personas con una larga trayectoria en la pediatría.

Continuamos tratando de concretar todos los "peros" y "cómos" que nos íbamos encontrando en las reuniones previas a comenzar el trabajo manual y de este modo llegamos a plantearnos varias preguntas que necesitaríamos resolver antes de comenzar con la restauración:

- ¿Dónde iría colocado el reloj una vez restaurado?
- ¿Qué sistema de sonería utilizaría en caso de necesitarlo?
- ¿Qué esfera se utilizaría y donde se colocaría? (Ya que no disponíamos de la original.)

Todas estas preguntas las fuimos resolviendo a lo largo de la realización del proyecto mediante reuniones con Nieves Gordón, nuestro contacto en el Planetario, y Xabier Álvarez.

Una vez recibimos el contacto de todas las personas que se habían presentado voluntarias para trabajar en la restauración convocamos una reunión con todos ellos en la que realizamos una visita al reloj y les explicamos en qué consistiría el proyecto.

En esa primera reunión acordamos como funcionaríamos y decidimos realizar una visita al taller de la fundación Yeregui Elkartea en Zestoa.

Esta reunión tuvo lugar en junio y en ella pudimos ver el lugar donde trabajan con los distintos relojes que restauran y varios de los que tienen ya restaurados. Estas

restauraciones contaron con la incorporación de sistemas electrónicos para ayudar a la puesta en hora y a dar cuerda al reloj; pero en este proyecto nos hemos limitado a la parte mecánica y de restauración.

Ese día finalizó con una comida con la que pretendíamos comenzar a forjar la relación entre las personas que íbamos a dedicarnos los siguientes meses a esta labor.

Pasado el verano; en el que continué tomando medidas y realizando el diseño virtual, volvimos a convocar una reunión con los y las voluntarias. En esta nueva reunión nos centramos en concretar como dividiríamos los distintos trabajos, dónde trabajaríamos y la disponibilidad de todos ellos.

Una vez realizado esto nos surgió un nuevo problema. El lugar que nos cedía el Planetario para realizar el trabajo era un pequeño taller ubicado junto al aparcamiento, el cual disponía de herramientas y maquinaria. El problema era que al ser todos personal ajeno al Planetario no podríamos utilizar la maquinaria que se encontraba allí por motivos de seguridad. Esto nos supuso un atraso de cerca de un mes; ya que, nos vimos en la obligación de contratar un seguro para las personas que íbamos a trabajar allí y conseguir la maquinaria necesaria de fuera del Planetario, con el tiempo que esto supone.

Mientras esperábamos a que finalizaran esos trámites, y teniendo la disponibilidad de los voluntarios, procedimos a hacer un calendario para repartir el trabajo por semanas. En este reparto tratamos de dar la misma carga de trabajo a cada persona, de modo que, cada día acudirían a trabajar entre 2 y 4 personas. En todos los casos este trabajo se realizó por las mañanas debido a la disponibilidad de todos ellos.

5.2.- Gestión de grupo de trabajo

Una de las labores con las que debe lidiar un ingeniero es. En muchos casos, la gestión de un grupo de personas. Este TFG ha tenido una componente de este tipo, ya que una parte importante de este trabajo ha sido la de liderar un grupo de trabajo. Tal como se ha comentado previamente, para poder realizar el proyecto fue necesario buscar un grupo de voluntarios y voluntarias que ayudaran a realizar la restauración.

La primera idea para lograr este grupo fue poner un anuncio en el Aula de la Experiencia de la Universidad y la respuesta fue muy satisfactoria, ya que un gran número de personas mostró interés en el proyecto. Tras ponernos en contacto con ellos se llevó a cabo una primera reunión en la que se les mostró el reloj y se les explicó cuál sería el trabajo a realizar y qué función podría desempeñar cada uno en la restauración y puesta en marcha del reloj.

La siguiente toma de contacto consistió en una excursión a Lasao-Zestoa en la que Xabier Alvarez Yeregui, Begoña Arruti y Juan Mari nos enseñaron su taller y los relojes que habían restaurado anteriormente, culminando el día con una comida de grupo en la que pudimos estrechar relaciones de cara al trabajo.

Después de un pequeño parón debido al verano reanudamos el trabajo. Para ello lo primero que se hizo fue organizar grupos de trabajo en función de la disponibilidad de cada voluntario.

La gestión del grupo fue principalmente la de realizar la comunicación con los y las voluntarias y mantenerles informados de todo lo que acontecía alrededor del reloj. Para poder comunicarme con todos ellos utilicé WhatsApp, el correo electrónico y las llamadas telefónicas, ya que no todos ellos contaban con móviles con WhatsApp. Por otro lado, se creó un apartado en MiAulario donde compartir todo el contenido que se iba creando en torno al reloj.

Al empezar una nueva fase del proceso de restauración, los primeros días yo estaba presente junto a ellos para explicar el trabajo que había que hacer y acordar con ellos el modo en el que íbamos proceder. Los días que no podía acudir, ellos me informaban del trabajo realizado de varios modos. Por un lado, en el Planetario se encontraba un **registro** (fig.43) en el que la persona que recogía las llaves del taller apuntaba la hora de entrada y lo mismo con la hora de salida al dejar las llaves. De este modo, se puede contabilizar el número de horas que se han empleado en cada fase. Por otro lado, dentro del taller, en un registro similar, cada voluntario apuntaba la fecha, su nombre y el trabajo realizado ese día; gracias a esto la persona que fuera a trabajar el día siguiente sabía por dónde seguir, y yo podía hacer un seguimiento del trabajo los días que no podía acudir. Muchas de ellas me avisaban del trabajo realizado también vía correo o mensajes de WhatsApp. A modo de ejemplo, la figura 44 muestra unas anotaciones realizadas tras una jornada de trabajo.

PIEZA DESMONTADA	ESTADO	DONDE SE HA GUARDADO	DÍA
Seguete Ancho + Vuelvo	Desmontado por defecto	Estantería 4 y 2	22-09
Rueda Rueda escape		"	22-09
Rueda Rueda B. mesa		"	22-09
Rueda Rueda B. mesa		"	22-09
Actuador central		"	22-09
Trabaja + escape		"	22-09
Rueda Rueda mesa		"	22-09
Placa y rueda B. mesa		"	22-09
Estructura movimiento		"	22-09
→ detalla		"	22-09
E24		"	22-09
Ventanas		"	22-09
E13 y E10		estantería 2	22-09
Actuadores S.I.	✓	Mesa 4 ↓	22-09
Agente actuadores	✓	Mesa 4 ↓	22-09
Rueda escape 52 (Bora)	En el taller y en el almacén		01-10
Rueda R. escape			01-10
Rueda R. escape			01-10
Rueda R. escape			01-10
G3 y G3			01-10
Sb 34	En el taller y en el almacén		01-10
Estructura entre			01-10
Actuadores S.D.			01-10
Movimiento de escape S.D.			01-10

PIEZA DESMONTADA	ESTADO	DONDE SE HA GUARDADO	DÍA
Seguete Ancho + Vuelvo	Desmontado por defecto	Estantería 4 y 2	22-09
Rueda Rueda escape		"	22-09
Rueda Rueda B. mesa		"	22-09
Rueda Rueda B. mesa		"	22-09
Actuador central		"	22-09
Trabaja + escape		"	22-09
Rueda Rueda mesa		"	22-09
Placa y rueda B. mesa		"	22-09
Estructura movimiento		"	22-09
→ detalla		"	22-09
E24		"	22-09
Ventanas		"	22-09
E13 y E10		estantería 2	22-09
Actuadores S.I.	✓	Mesa 4 ↓	22-09
Agente actuadores	✓	Mesa 4 ↓	22-09
Rueda escape 52 (Bora)	En el taller y en el almacén		01-10
Rueda R. escape			01-10
Rueda R. escape			01-10
Rueda R. escape			01-10
G3 y G3			01-10
Sb 34	En el taller y en el almacén		01-10
Estructura entre			01-10
Actuadores S.D.			01-10
Movimiento de escape S.D.			01-10

Figura 43. Registros del taller.

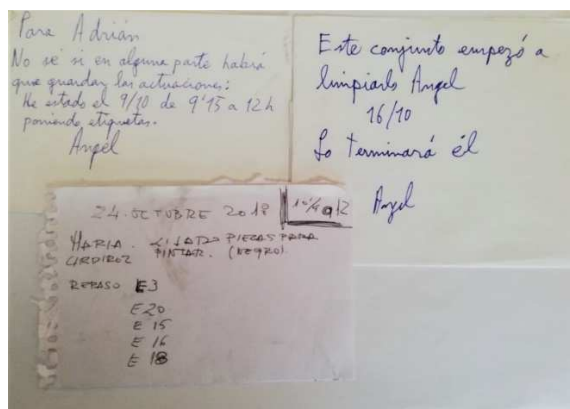


Figura 44. Notas de los voluntarios.

Para las tomas de decisiones se ha tenido en cuenta a todo el grupo de trabajo y para algunos casos puntuales se ha pedido la opinión de algunos de ellos en función a su experiencia en el área que era necesaria la ayuda. Por ejemplo, para comprar los materiales para realizar la limpieza se contó con la ayuda de Tomás y José Mari; ya que tenían experiencia. Y, para otros trabajos y compras se consultó a Ángel; que cuenta con un taller en el que realiza sus propios trabajos y conoce bien las herramientas, materiales y procesos necesarios para desarrollar proyectos como este.

La gestión del grupo me ha resultado muy fácil gracias a la implicación y dedicación de todos ellos. Algo que es de agradecer; más aun teniendo en cuenta lo difícil que fue en algunos momentos poder concretarles las cosas. Durante la restauración hubo muchos parones; la mayoría de ellos debidos a temas burocráticos o de plazos, y tener parado a un grupo de trabajo que estaba trabajando con tantas ganas y que estaba dedicando su tiempo desinteresadamente ha sido uno de los aspectos más difíciles. A pesar de todo, siempre han entendido que estos parones tenían que darse y que no era culpa de nadie, y gracias a ello ha sido más sencillo gestionar estos imprevistos.

Por otro lado, también hubo que realizar varias reuniones tanto con el Planetario como con miembros de la asociación Yeregui Elkarte, como son Nieves por parte del Planetario o Xabier de Yeregui Elkarte. En estas reuniones tratamos aspectos como la nueva ubicación del reloj, el seguimiento del proceso o la financiación de los trabajos.

5.3.- Prueba de funcionamiento inicial

El primer paso para comenzar con la restauración consistió en una prueba inicial con un peso orientativo en el que trataríamos de detectar primeros posibles defectos o fallos en el mecanismo del reloj.

Para esto necesitábamos unas **pesas**, ya que, no disponíamos de las originales del reloj. Buscamos en los talleres de la Universidad y nos encontramos con las siguientes opciones:

- Cilindros de hormigón:
 - Peso: 12 kg
 - Longitud: 30 cm
 - Diámetro: 15 cm
- Tochos metálicos x2 en el taller de mecánica
 - Peso: 10 kg cada uno
 - Longitud: 6 cm
 - Diámetro: 18 cm
- Piezas metálicas con forma de L x6
 - 7,5 kg cada una
- Piezas metálicas x3
 - 25x25x10 cm
 - peso: 37 kg cada una

Consultamos los otros proyectos de los que disponíamos y observamos que para esta prueba inicial se utilizaban **70-80 kg**; ya que, esta primera prueba hay que realizarla con valores orientativos del peso con los que ir determinando el peso real con el que trabajará el reloj. Teniendo en cuenta esto último decidimos utilizar las piezas metálicas de 37 kg.

Esta primera prueba la realizamos en el almacén donde se encontraba en un inicio el reloj ya que todavía no disponíamos del taller.

En este momento nos encontramos un mecanismo claramente afectado por los años y por el nulo mantenimiento desde que fue retirado en 1991. La suciedad y el óxido ejercían una gran resistencia a la hora de girar los ejes y aunque el mecanismo se movía si le ayudabas a hacerlo, presentaba una gran rigidez y enseguida se detenía.

Para poder hacer que se moviera tuvimos que colocar las 3 pesas; es decir, cerca de 120 kg en el tambor de movimiento para poder acceder a esa parte.

A pesar de ello el mecanismo no llegaba a moverse por sí solo, se bloqueaba y precisaba de ayuda en algunos casos para seguir avanzando.

La conclusión del equipo y de Xabier Alvarez y su mujer, que nos acompañaron en esta primera prueba, fue clara, debíamos comenzar cuanto antes a desmontar y realizar una nueva prueba una vez limpiado el mecanismo. El mecanismo no mostraba fallos o roturas a primera vista, por lo que dedujimos que el problema a la hora de moverse venía principalmente de la suciedad y la necesidad de engrasarlo. De este modo, decidimos que comenzaríamos a preparar todo para comenzar con el desmontaje.

5.4- Gestiones previas a la restauración

Una vez tomada la decisión de comenzar con la restauración, llegó el momento de empezar a preparar todo para poder llevar a cabo el desmontaje.

Lo primero, como ya se ha mencionado en el primer punto, fue realizar un **seguro** para poder trabajar en el taller del Planetario. Al ser todos los que íbamos a trabajar con el reloj ajenos al Planetario debíamos realizar este seguro para que, en caso de haber cualquier accidente, por mínimo que fuera, el Planetario estuviera cubierto y la persona afectada contara con un seguro.

Antes de empezar a desmontar, buscamos el **material necesario** para el desmontaje y la posterior limpieza. Para ello tuvimos la ayuda de Xabier, que puso a nuestra disposición una lista de los materiales que usan ellos en sus restauraciones y sus precios. También consultamos este tema con los voluntarios Tomas y Ángel, que ayudaron a decidir qué material adquirir.

Realizamos las compras en distintas ferreterías y de este modo nos provisionamos de todo lo necesario para la restauración. El material consistió en lo siguiente:

- Equipos de protección individual para la seguridad de las personas que fueran a estar trabajando
- Lijas de distinta rugosidad
- Cepillos para las amoladoras
- Cepillos de mano
- Pintura
- Barniz para metal
- Granete automático para realizar marcas en el metal
- Brochas
- Sirga
- Aceite
- Producto para limpiar cobre y bronce

Tomás también aportó parte del material, ya que, varios de los cepillos y las pastas que se mencionarán más adelante las trajo él de su taller personal.

Para finalizar, antes de comenzar con el desmontaje, organizamos el taller con la ayuda de Ángel dejando espacio libre para las distintas partes del reloj que se iban a desmontar (sonerías izquierda y derecha y movimiento). Para colocar las piezas Ángel trajo varias cestas de gran tamaño para colocar todo de manera ordenada. Mantener el orden en el proceso de desmontaje era de vital importancia, ya que el reloj consta de muchas piezas y algunas de ellas similares.

5.5.- Desmontaje

El primer paso a la hora de comenzar con el desmontaje consistió en **una prueba con las pesas** de la sonería para saber si como estaba montado el reloj funcionaba correctamente. Para ello colocamos las pesas en el centro del reloj atadas a ambas sonerías y probamos su funcionamiento. Aunque seguía quedándose bloqueado comprobamos que los actuadores funcionaban correctamente, por lo que comenzamos con el desmontaje.

Antes de que los voluntarios comenzaran a trabajar se realizó el **etiquetado** de las piezas del reloj para evitar confusiones una vez desmontado. Este etiquetado se realizó previamente con **pegatinas blancas** (fig.45) numeradas según el número de pieza y la parte del reloj a la que pertenecían y posteriormente fueron reemplazadas por etiquetas de **chapa** grabadas mediante una grabadora manual aportada por Ángel (fig.46) y atadas a las piezas con gomas. Para realizar el etiquetado se diferenciaron 4 partes del reloj: movimiento (M), sonería izquierda (SI), sonería derecha (SD) y estructura (E).



Figura 45. Etiquetado con pegatinas blancas.

El problema de este etiquetado fue la duración de las pegatinas. Por un lado, había algunas piezas en las que el pegamento de las pegatinas no tenía suficiente agarre y se despegaban; por otro, se ensuciaban con facilidad y eso dificultaba su lectura. Por eso, se decidió reemplazarlas por las de chapa.

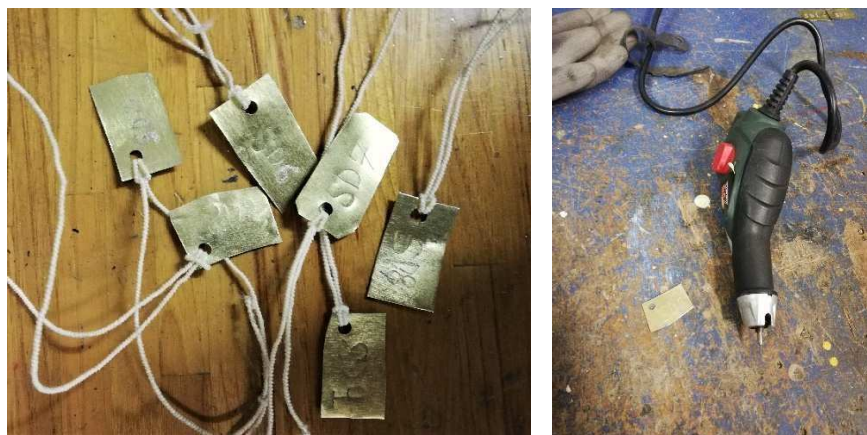


Figura 46. Etiquetas de chapa (Izq.) y grabadora manual (Drcha.).

La primera parte en ser desmontada fue la del **movimiento**, la más delicada teniendo en cuenta que es donde se encuentra el áncora, pieza clave para el funcionamiento del reloj. Los tres desmontajes se realizaron de la misma manera, primero quitar los pesos y después comenzar de arriba hacia abajo.

Este proceso nos llevó menos tiempo del esperado y el primer día pudimos realizar la prueba anteriormente mencionada y este desmontaje.



Figura 47. Reloj y piezas del mismo durante el desmontaje.

En los siguientes dos días se realizó el desmontaje de las **dos sonerías**, marcando con el **granete automático** las ruedas que precisaban de una posición concreta para un funcionamiento correcto. Estas marcas serían de ayuda en el posterior proceso de montaje, ya que indicarían la correcta posición relativa entre piezas a ensamblar.

Estas ruedas son las que juegan un papel fundamental en el desbloqueo de las sonerías; es decir, las ruedas primera y segunda con los piñones que engranan de ambas sonerías. Estas posiciones no pueden modificarse; ya que, estas ruedas cuentan con piezas como los pivotes o los flejes que deben colocarse en una posición concreta. La figura 48 muestra alguna de las marcas de granete realizadas.



Figura 48. Marcas de granete en las posiciones de las ruedas.

Para poder extraer los rodamientos de los ejes contamos con la ayuda de un extractor manual que aportó Ángel de su taller personal.



Figura 49. Extractor manual.

A la hora de extraer los **rodamientos** se comprobó que todos ellos cuentan con un plano que hace que encajen perfectamente y en una única posición en los agujeros de la estructura dispuestos para estos rodamientos; ya que estos planos probablemente tendrían su origen en los cojinetes de bronce que con toda probabilidad tendría el reloj cuando fue construido en 1827. Al ser sustituidos por rodamientos, hubo que hacerles un plano también a estos para poder encajarlos en sus alojamientos (fig.50). Estos agujeros también cuentan con un plano que coincide con el de los rodamientos. Para evitar confusiones con los rodamientos, todos ellos se almacenaron de la misma manera, se pegaron a su respectiva tapa con celo y se etiqueto el conjunto. Se prepararon 3 bolsas para almacenar los rodamientos, una para cada parte del reloj.



Figura 50. Plano en los rodamientos (Izq.) y en la estructura (Drcha.).

Una vez finalizado el desmontaje se preparó la maquinaria para poder trabajar. Las máquinas que se utilizaron fueron una amoladora cedida por la Universidad y un esmeril que aportó José Mari Martorell.

Las piezas desmontadas se guardaron en cajas de madera; separándolas según la parte del reloj a la que pertenecían. De este modo, no habría dudas a la hora de volver a montarlas y se mantendría cierto orden durante la limpieza de estas.



Figura 51. Piezas guardadas en cajas.

5.6.- Limpieza y pintado

Dada la suciedad, el polvo y las emisiones de gases de los distintos productos que podía generar la limpieza de las piezas, se decidió trabajar en el exterior del Planetario. Para ello se pidió permiso al Planetario para realizar varios taladrados en **el exterior del aparcamiento**, para colocar la amoladora fija; y también para sacar fuera una mesa de trabajo con mordazas que se encontraba en el interior del taller. Una vez recibimos el sí del responsable de seguridad del Planetario, el primer día de limpieza, procedimos a llevar a cabo estas labores y así fue como preparamos el que sería el espacio de trabajo el próximo mes si el tiempo lo permitía (si no se realizaría en el interior del taller).

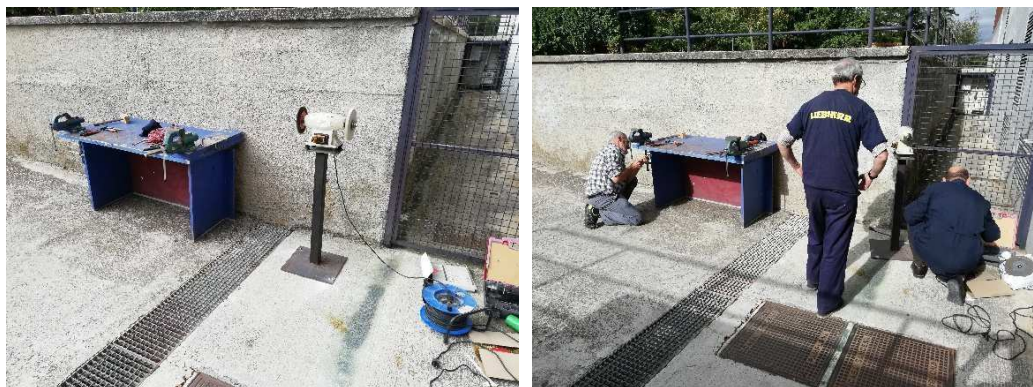


Figura 52. Maquinaria en el lugar de trabajo y voluntarios preparándolo.

De este modo, cada día, lo primero que se hacía era sacar toda la maquinaria fuera para trabajar ahí. Este proceso era un poco farragoso, pero, trabajar fuera era mejor para todos por los motivos mencionados anteriormente.

Para este proceso se separó el grupo de trabajo en dos en función de las tareas que iban a realizar. Para separar el grupo se tuvo en cuenta la experiencia de cada voluntario con las máquinas que se iban a emplear, para minimizar el riesgo de accidentes. De todos modos, ellos y ellas continuaron trabajando conjuntamente a pesar de realizar distintas tareas.



Figura 53. Equipo de trabajo en el taller.

Las personas con experiencia con las máquinas fueron las encargadas de limpiar las piezas metálicas del mecanismo del reloj. Este proceso consistía en **desbastar** las piezas con las ruedas de cepillos de alambre que se colocaban en las amoladoras, una vez eliminada la suciedad se les aplicaba dos pastas para pulir mediante ruedas de trapo y finalmente se le aplicaba una pequeña capa de aceite de coches para evitar que volviera a aparecer el óxido. Este proceso se realizó en todas las piezas de **hierro** del mecanismo.

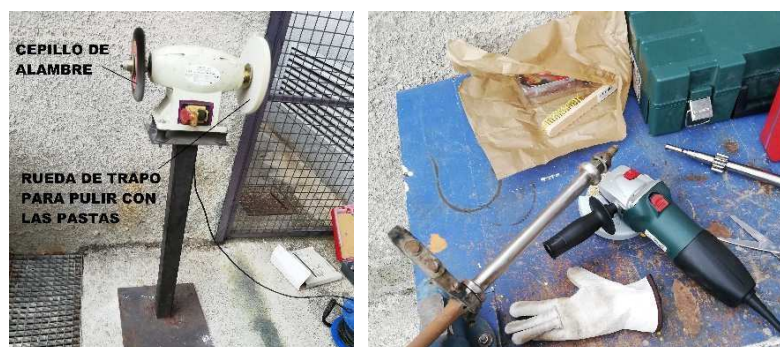


Figura 54. Esmeril (Izq.) y amoladora (Drcha.).



Figura 55. Pastas de desbaste (Izq.) y aceite (Drcha.).

Para las **piezas de bronce** se utilizó un proceso distinto. Al tratarse de un material más blando, al cepillarlas la maquina eliminaba demasiado material y estaba la posibilidad de estropear la geometría de la pieza. Por lo tanto, para estas piezas se utilizó un líquido especial para la limpieza de piezas metálicas de bronce. Aplicando

este producto con cuidado y siguiendo las instrucciones del producto se logró una limpieza de una calidad similar a la lograda para el resto de las piezas.



Figura 56. Producto empleado para la limpieza de las piezas de bronce (Izq.) y rueda de bronce limpiada con él (Drcha.).

Las personas que no tenían experiencia con las máquinas se encargaron de **lijar** manualmente las piezas de la estructura del reloj, las cuales llevaban una gruesa capa de pintura que había que eliminar para poder aplicar la nueva. Se utilizaron lijas de distintos grosores de grano, de mayor grano en las zonas con más pinturas, y más finas en las zonas con menos capa.

Las siguientes semanas, cada día, acudieron los voluntarios a los que les tocaba trabajar ese día y fueron realizando la limpieza del reloj. Este proceso fue más rápido de lo esperado, también, y en poco tiempo tuvimos todo el reloj limpio y preparado para el montaje.



Figura 57. Piezas limpias (Izq.) y comparación con pieza sin limpiar (Drcha.).

La limpieza de los **tambores de madera** y de la **placa del reloj** las realizó Ángel. Para los tambores utilizó una pistola de aire comprimido y Xylamon. El Xylamon es un producto para tratar la madera en profundidad y prevenir los ataques de hongos o insectos xilófagos. La restauración de la placa la realizó con jabón, trapos y cepillos. El proceso lo describe él de la siguiente manera:

“Proceso de limpieza:

Empecé con jabón fuerte para desengrasar y quitar lo mayor. Se notó mucho. Trabajo con un trapo con la mano, sin máquina.

Después con lana de acero muy fina. Abrillanta y no raya en exceso. También con la mano.

Tiene una especie de baño de color plata que o lo hicieron mal o se ha perdido en parte. Es curioso que si se quisiera quitar (que no es el caso) habría que lijar bastante fuerte.

El borde, que no me importaba que tuviera rayas, (de hecho ya las tenía y estaba irregular) le pasé el cepillo de fibras, (no de acero).. ese rojo sujeto en el torno, porque así me deja sujetar el disco con las dos manos.

Para mí es más cómodo tener fijo el torno que sujetar la pieza y pulir con el taladro.

Espero que te sirva la explicación.”

Antes de montar el reloj se le aplicó la primera capa de **pintura** a las piezas de la estructura y se dejó la segunda capa y la aplicación del barniz a las piezas del mecanismo para después del montaje; ya que cabía la posibilidad de tener que volver a desmontarlo. Por lo tanto, la limpieza finalizó a falta de aplicar el acabado final sobre las piezas.



Figura 58. Piezas pintadas.

Gracias al proceso de limpieza puede verse con más detalle cómo ha afectado el paso de los años a las piezas de reloj. En la siguiente imagen se muestra el desgaste y las marcas de una de las ruedas.

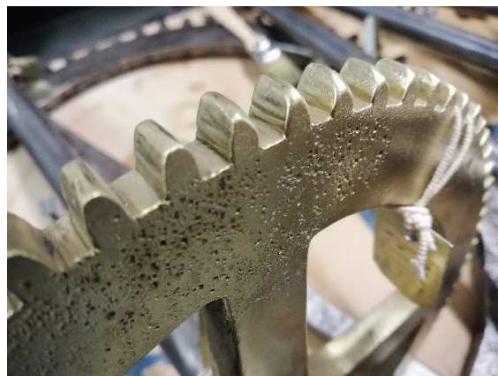


Figura 59. Desgaste y marcas en rueda restaurada.

5.7- Montaje

La fase de montaje se realizó en tres días; separando el proceso en las tres partes que componen el reloj (movimiento y sonerías).

5.7.1.- Movimiento

Lo primero en ser montado fue la estructura y seguido el mecanismo de movimiento. Para ello se comenzó de abajo hacia arriba y teniendo especial cuidado en el montaje de la rueda de escape y el áncora.

Para poder ir colocando los ejes y las ruedas, los pernos de la estructura no se apretaron al máximo posible; de este modo se dispondría de cierta holgura que permitiría colocar las piezas del mecanismo.



Figura 60. Proceso de montaje del mecanismo de movimiento.

Una vez finalizado el montaje de esta parte se realizó una prueba de funcionamiento sin colocar ningún peso. El movimiento del péndulo fue suficiente para

comprobar la suavidad con la que se movía el tren de engranajes y así asegurar que la limpieza del mecanismo mejoraba considerablemente su funcionamiento.

Se cometió un **error de montaje**, ya que al colocar una de las barras horizontales de la estructura se posicionó mal. Esto suponía que la barra horizontal en la que se coloca el eje del actuador en forma de Y se encontraba en el lado opuesto, impidiendo así el correcto montaje del mecanismo de activación de la sonería de cuartos.

Este error se subsanó el siguiente día antes de comenzar con el montaje de la sonería de cuartos; pero supuso un retraso de más de una hora. La pieza cuenta con parte del eje con sección cuadrada, por tanto, para ponerla en la posición correcta se debía o bien desmontar todo el mecanismo de movimiento o desmontarlo solo de un lado manteniéndolo en su posición en el lado opuesto. Se optó por la segunda opción con la intención de ahorrar trabajo y poder arreglar el error con la mayor brevedad posible.

5.7.2.- Mecanismos de sonería

A pesar de realizarse en distintos días el montaje de ambos mecanismos de sonería se realizó de la misma manera. Siguiendo el mismo proceso que en el caso del movimiento, el montaje del tren de engranajes se comenzó desde abajo hacia arriba. En estos dos casos no se cuenta con rueda de escape, por lo que no había el peligro que se mencionaba en el apartado del movimiento. En estos mecanismos había que tener especial **fijación** en las **marcas** que se realizaron en las piezas antes de desmontarlas. Estas marcas determinan la posición correcta de la unión de algunas piezas que resultan críticas para el funcionamiento correcto y preciso del reloj. Estas uniones son las de las ruedas primeras y segundas de cada sonería con sus respectivos piñones y la de la rueda imperial de la sonería de horas con su piñón. El montaje de esas uniones se realizó colocando primero la pieza de la unión que se encontrará más abajo. Una vez esta pieza estaba en su emplazamiento se colocaba la pieza a la que iba unida en la posición correcta de funcionamiento asegurando así que el mecanismo se encontraba montado correctamente.



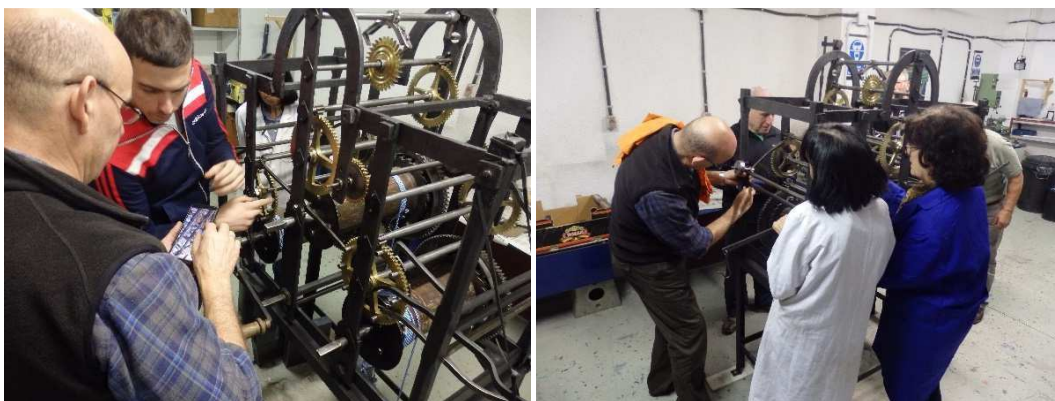


Figura 61. Proceso de montaje de los mecanismos de sonería.

Después de colocar los trenes de engranajes se colocaban los actuadores. Estos actuadores cuentan con unas piezas en las que encajan sus ejes y facilitan su montaje y desmontaje.



Figura 62. Pieza para colocar los actuadores.

Al acabar de montar el reloj se realizaron varias **pruebas de funcionamiento**. Para comprobar no solo si el reloj funcionaba al darle cuerda, sino saber también si funcionaba durante todo el tiempo de caída de las pesas, uno de los voluntarios iba un día a dar cuerda y a última hora de la tarde o al día siguiente otro iba a comprobar si las pesas estaban en el suelo y dar cuerda. Para llevar un seguimiento de estas pruebas y del montaje se realizó la siguiente tabla:

MONTAJE Y PRUEBAS					
Prueba	Día	¿pesas en el suelo?	no, ¿por que?	Voluntaria/o	comentarios
1º Montaje	28/11/2018	-	-	Todos	Montaje del movimiento y primeras pruebas. Funcionaba sin problemas. Una pieza estaba colocada al revés (SD40).

2º Montaje	05/12/2018	si	-	Todos	<p>Montaje de la sonería derecha (cuartos). Se recolocó la pieza de movimiento mal colocada el primer día con un retraso de 1 hora. La sonería Drcha. Volvió a dar problemas en la misma pieza que las pruebas previas a la limpieza. Pieza SD39</p>
3º Montaje	10/12/2018	Si	-	Todos	<p>Montaje de sonería izquierda (horas). Se colocó siguiendo las marcas en las ruedas sin ningún problema; tras varias pruebas funciona bien. Se recolocaron los ejes de la sonería de cuartos, ya que algunos no estaban debidamente colocados. Para suplir el problema que da la pieza SD40 se colocó una goma que le ayuda en el retorno a la posición de origen. Para esta sonería son necesarias 2 pesas (1 de Xabier y 1 de UPNA). El reloj se dejó funcionando con pesas en los 3 tambores (1 para SI, 1 para M y 1 para SD). Trás hablar con Xabier y Jokin se decide preguntar a Relojería San Martín o relojero Eduardo por la pieza que da problemas. Se les propuso a los voluntarios acudir a diario a dar cuerda al reloj durante 2 semanas.</p>

1ª Subida de pesas y pruebas	11/12/2018	Si	-	Tomás	Tomás acudió a levantar las pesas para continuar probando el funcionamiento del mecanismo. Propone volver a recolocar la sonería de cuartos, ya que, no funciona del todo bien. Tratará de pasar por San Martín para comentarles los problemas con la pieza. También propone probar a colocar un peso en esa pieza para ayudar a su retorno.
2ª Subida de pesas y pruebas	12/12/2018	Si	-	Tomás Marisa María	Los voluntarios acudieron a levantar las pesas y aprovecharon para recolocar las piezas de sonería de cuartos. Las dejaron colocadas en la posición que estiman correcta. Colocaron la pesa en el péndulo con una cadena para alargar el tiempo de funcionamiento.
3ª Subida de pesas y pruebas	13/12/2018	si	-	Tomás María	Al llegar Tomás y María las pesas estaban en el suelo por lo que el reloj completó de nuevo el ciclo completo sin problemas con los cambios del día anterior. Calzaron el reloj con varias maderas para subir la altura de la base y poder colocar el péndulo con su altura y la pesa. Para el péndulo Tomás llevó una pieza que preparó él mismo para poder unir las dos barras que lo forman y regularlo.

					<p>Para resolver el problema de la pieza SD39 Tomás colocó una masa mediante una varilla a modo de contrapeso, así la pieza en reposo no queda en el eje vertical, se desplaza a la posición de origen a la que debería desplazarse y de este modo se sustituye la goma que se había colocado antes. La pieza original ha sido agujereada para esto, lo que es un error que posiblemente podría haberse evitado.</p> <p>El reloj funciona correctamente con las nuevas modificaciones, por lo que, se continuará una semana más con las pruebas.</p>
4ªSubida de pesas y prueba	14/12/2018				<p>A media mañana conversación por tlf con Jokin para comentar las modificaciones del día anterior. Calzar el reloj y la pieza de unión del péndulo se valoran de manera positiva ya que nos ahorrarán trabajo. Por otro lado preocupa haber agujereado una pieza original pudiendo haber sido evitable. Se decide continuar con las pruebas una semana para posteriormente descansar en Navidades y continuar una vez pasadas esas fechas. Entonces se procederá a calcular con detalle el tiempo de ciclo;</p>

					<p>tiempo que tarde en dar una hora, longitud necesaria del péndulo... y se comenzará con el diseño del sistema de campanas y esfera. La esfera original puede que este en propiedad del Ayuntamiento, ya que, como ha leído Jokin en un libro la actual se colocó en la década de los 40-50.</p>
5ªSubida de pesas y prueba	17/12/2018	no	Pieza SD39	Marisa, Tomás	<p>Al llegar Marisa, sobre las 8:30, las pesas estaban subidas y el reloj no funcionaba. Mandó varias fotos y videos en las que puede verse que el bloqueo volvía a estar en la pieza SD39. Más tarde esa misma mañana, fue Tomás y volvió a dejar el reloj en funcionamiento. Aprovechó para cronometrar y comprobar que 1 cuarto de hora lo daba en aproximadamente 11:30 minutos con esa longitud de péndulo.</p>
6ªSubida de pesas y prueba	19/12/2018	si		Tomás/José Mari	<p>Tras comprobar que las pesas estaban en el suelo realizaron varias pruebas calzando el reloj para alargar el péndulo pero no consiguieron variaciones notables en el tiempo de funcionamiento del reloj. También contacto con Eduardo, relojero de Alsasua, que se mostró dispuesto a acudir pasadas las fiestas para</p>

					orientarnos en el funcionamiento del reloj.
7ªSubida de pesas y prueba	20/12/2018	si		Tomás	Tomás colocó la esfera y la aguja del reloj para comprobar la hora que da el reloj. Después dejó el reloj en marcha.
8ªSubida de pesas y prueba	21/12/2018	si		Tomás	Las pesas estaban en el suelo y volvió a darle cuerda al reloj.

Tabla 2. Registro de pruebas tras montaje.

En la tabla puede verse como seguí habiendo problemas con el mecanismo de la sonería de cuartos. Debido a esto, después de realizar estas pruebas se comenzó a buscar soluciones a los problemas que habían aparecido.

5.8.- Pruebas y arreglos

Después de limpiar el reloj y realizar varias pruebas hubo que realizar varias reparaciones en él. A pesar de que su funcionamiento era más suave que antes, y que el mecanismo funcionaba casi a la perfección, se observó que la parte de la sonería de cuartos fallaba.

5.8.1.- Mecanismo de la sonería de cuartos

El problema del mecanismo de la sonería de cuartos se identificó en la interacción entre el **actuador en forma de Y**, el primer actuador de la sonería de cuartos y la rueda pivotada del eje de la **rueda minutería**. Se realizaron varias pruebas de funcionamiento para observar por qué ocurría ese problema y se llegó a las siguientes conclusiones:

- El actuador en forma de Y no retornaba a su posición original.
- El pivote de la rueda segunda no se bloqueaba con el actuador en forma de Y en la posición de bloqueo.
- Los mecanismos de movimiento y sonería de cuartos precisaban de más peso en las pesas.

Por culpa de estos errores el reloj se acababa parando y para solucionarlo se plantearon dos **alternativas**:

1. Colocar una **goma** en el actuador en forma de Y que le obligará a volver a su posición original.
2. Colocar un **contrapeso** en el actuador en forma de Y.

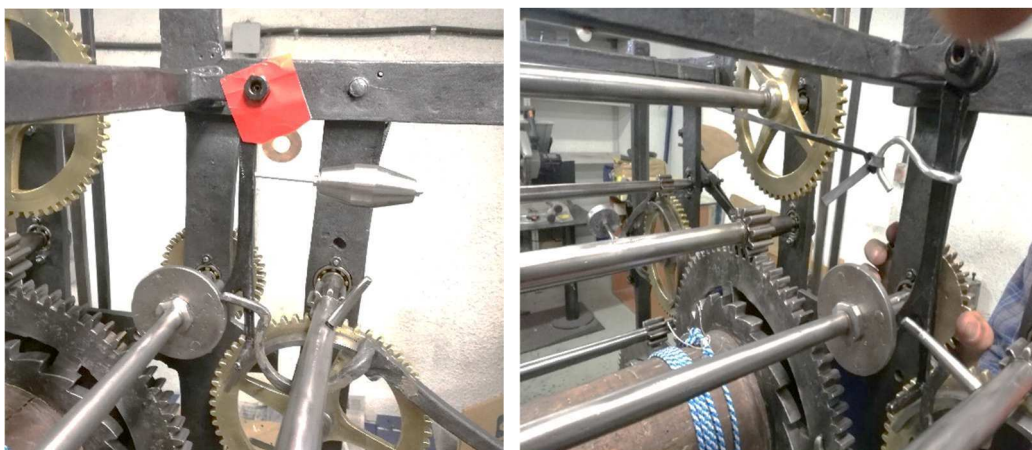


Figura 63. Alternativa del contrapeso (Izq.) y alternativa de la goma (Drcha.).

Estas dos opciones solucionaban el problema del retorno del actuador Y; pero, el bloqueo entre el pivote de este actuador y el del eje del pivote de la rueda segunda seguía dando problemas. Para ellos se optó por colocar un **cilindro hueco** en el pivote del actuador Y. Gracias a este cilindro los dos pivotes lograban contactar y realizar el bloqueo necesario. Esta solución podría combinarse con cualquiera de las otras soluciones y de este modo asegurar un correcto funcionamiento. La función del cilindro es la de agrandar el radio del pivote del actuador Y lo justo para contactar con el otro pivote.



Figura 64. Prueba con cilindro hueco.

Las dos opciones suponían añadir elementos al mecanismo, y siendo uno de los objetivos de la restauración ser lo menos invasivos posible, se decidió consultar al relojero de Altsasu, Eduardo. Con su ayuda y consejos, decidimos corregir la posición del actuador en forma de Y y del primer actuador, y sacar ligeramente el pivote del eje de la rueda segunda.



Figura 65. Explicaciones de Eduardo (Izq.) y enderezado de piezas (Drcha.)

Este modo de proceder se asemeja más al que se utilizaba en la época en la que se construyó el reloj, y es menos invasiva. Realizando estas correcciones se comprobó que el actuador en forma de Y era empujado de vuelta a su posición original y que este actuador se bloqueaba con el pivote de la rueda segunda en la posición de bloqueo. Por otro lado, modificamos ligeramente la posición del eje de la rueda segunda; ya que, el pivote de bloqueo estaba demasiado alejado del actuador en forma de Y y le costaba demasiado realizar el bloqueo para la precargar del toque de campanas. Con estas nuevas modificaciones se comprobó que el funcionamiento del reloj era correcto y se decidió dar por buena la reparación.



Figura 66. Alternativa escogida.

En la imagen (fig.66) puede apreciarse como los dos pivotes llegan a contactar al sacar el del eje. A parte, al enderezar el actuador de bloqueo, este empuja al actuador Y ayudando a su retorno.

Al realizar estos arreglos se pudo observar que alguna piezas estaban ligeramente deterioradas, tal como muestra la Figura 67.

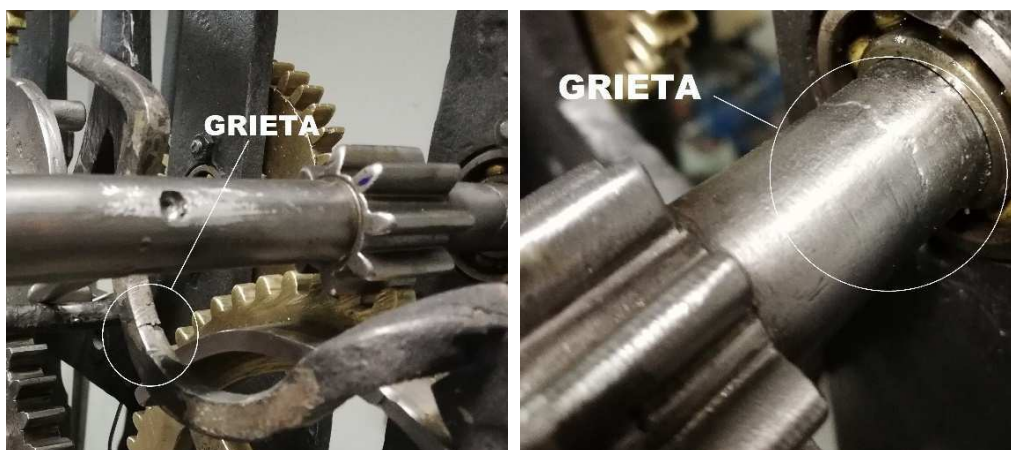


Figura 67. Grietas en varias piezas.

Como puede verse en las imágenes, se encontraron varias **pequeñas grietas** en algunas piezas. Las del eje pueden haber aparecido debido a la fatiga; ya que esta pieza estuvo durante años trabajando en rotación apoyado sobre dos rodamientos. Estos rodamientos estaban muy sucios cuando se comenzó a resturar el reloj, aumentando así las tensiones por rotación que podían aparecer en el eje. Este eje en concreto es el que cuenta con el pivote que bloqueará el mecanismo de cuartos una vez realizada la carga para el toque de campanas. Al realizar este bloqueo el eje sufrirá; y hay que recordar que este bloqueo se realiza 4 veces por hora. Este eje es también en el que se coloca uno de los venteroles. Como se comentará en el siguiente punto, estos elementos estaban demasiado rígidos y fue necesario repararlos. Esto deriva en un tercer factor que afecta a la aparición de tensiones en el eje.

La otra pieza agrietada, el actuador, es una de las piezas que hubo que **enderezar**. Al ver la grieta, hubo que tener un cuidado extremo para tratar de enderezar la pieza sin empeorar su estado. Una vez enderezado, se probó en funcionamiento y de este modo se comprobó que la grieta era superficial; pero, habrá que tener cuidado con ella y revisarla periódicamente por si llegara a precisar de soldadura.

5.8.2.- Venteroles

En la visita del relojero Eduardo también comentó que los venteroles funcionaban con una **rigidez** excesiva. Estos elementos deben absorber parte de la energía del tren de engranajes y aprovecharla para que el frenazo no sea muy brusco cuando vuelven a quedar bloqueados los mecanismos de sonería. Para poder hacer esto los venteroles tienen que poder girar sobre su eje al bloquearse el eje al que van unidos. En el estado en el que se encontraban no eran capaces casi de girar y fue necesario soltar un poco los tornillos y engrasar el eje.

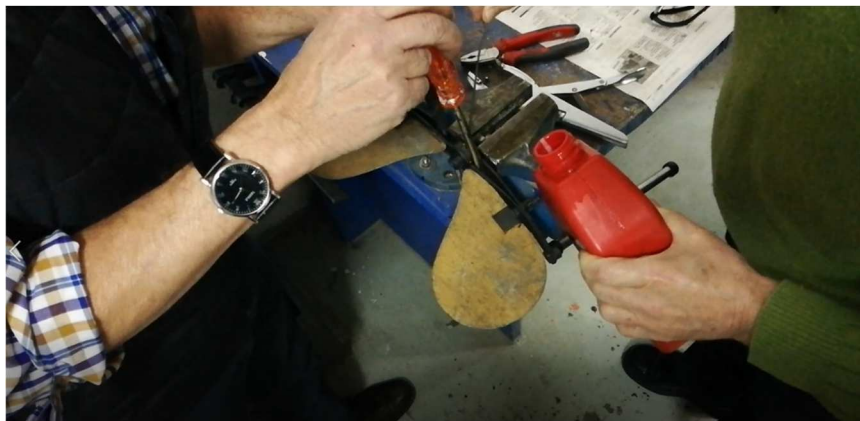


Figura 68. Reparación de venterol.

5.8.3.- Unión péndulo

Como ya se ha comentado anteriormente, el péndulo no tendrá la **longitud original** en su nueva ubicación. Por ello, se tomó la decisión de diseñar una pieza que une las dos varillas del péndulo con las que se contaba. Cabe destacar que faltan piezas originales del reloj, entre ellas alguna que servía originalmente para unir estas dos varillas.

Con la ayuda de Tomás, se diseñó una pieza que no solo une, sino que también sirve para regular la longitud del péndulo. La pieza es la que se muestra en la siguiente imagen.



Figura 69. Pieza para la unión del péndulo.

Con esta nueva pieza se logra la longitud deseada para el péndulo en su nueva ubicación, y se logra unir las dos piezas que precisaban de una pieza de unión.

5.8.4.- Nuevo mango para la manivela

Esta nueva pieza no influye en el funcionamiento del reloj ni supone un cambio en su mecanismo. Su función es meramente **estética y ergonómica**. La manivela contaba con un agarradero de hierro que, sabiendo el peso que hay que levantar con ella, resultaba ligeramente incómoda. Para mejorar esto, Ángel fabricó un mango de madera que además de resultar más cómodo a la hora del agarre, gira sobre el eje del agarradero, facilitando de este modo dar cuerda al reloj.

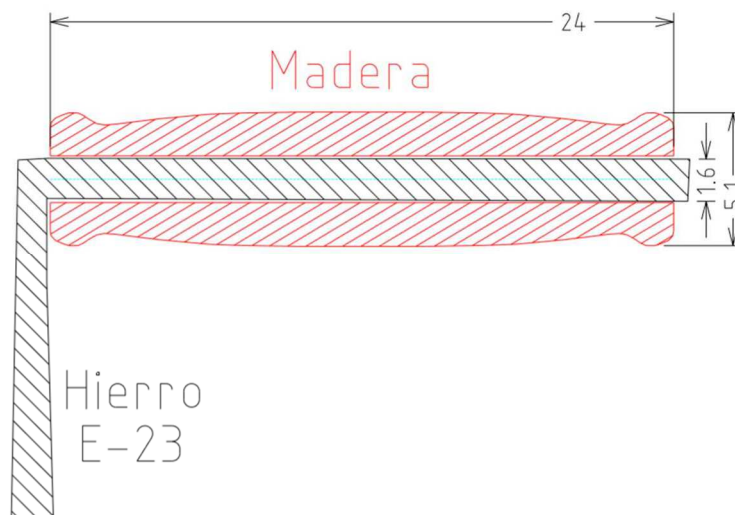


Figura 70. Diseño realizado por Ángel.

Antes de realizar la pieza Ángel me mostró el diseño que había hecho, y una vez confirmado fabricó la pieza en su taller.



Figura 71. Nuevo mango para manivela.

5.8.4.- Rodamientos

Otra reparación que se planteó inicialmente fue la de reemplazar los rodamientos por unos nuevos. Al hacer girar los ejes podía observarse que, aunque había mejorado mucho su funcionamiento respecto a cómo estaban inicialmente, seguía faltándoles algo de **suavidad**, y esto se le achacó a los rodamientos.

Antes de reemplazar los rodamientos por unos nuevos se realizó la prueba de **limpiar** los rodamientos y volver a colocarlos. Para limpiarlos se utilizó aceite de motor de coches; el mismo que se utilizó para evitar que se oxidaran las piezas una vez pulidas. Tras limpiarlos bien con aceite se limpiaba el aceite sobrante con un trapo seco y se volvían a colocar en sus agujeros. El funcionamiento con los rodamientos engrasados fue muy satisfactorio, por lo que, se decidió mantener los que tenía el reloj para ser lo menos invasivos posible en la restauración. Además, de esta forma se

evitó tener que mecanizar los planos necesarios para que encajasen en sus alojamientos sobre rodamientos nuevos.

5.9 Resumen del proceso de restauración

El proceso de restauración se completó con éxito y el reloj está en funcionamiento de nuevo a la espera de ser colocado en su nueva ubicación.



Figura 72. Reloj después de ser restaurado.

En la siguiente tabla se resume el proceso con los tiempos y el equipo empleado en cada fase del mismo.

RESTAURACIÓN DEL ANTIGUO RELOJ DEL AYUNTAMIENTO DE PAMPLONA

FASE	TIEMPO APROX.	EQUIPO EMPLEADO
1ª toma de contacto con el reloj	2 horas	-
Toma de medidas	10 horas	metro y material de dibujo
Etiquetado	8 horas	etiquetas, rotuladores y equipo de etiquetado con chapa
Prueba de funcionamiento con pesas aproximadas	1 hora	sirga 6m y pesas de 40kg de UPNA
Desmontaje de parte de movimiento	2 horas	granete automático y herramienta del Planetario
Desmontaje sonería izquierda (horas)	2 horas	granete automático y herramienta del Planetario
Desmontaje sonería derecha (cuartos)	3 horas	granete automático y herramienta del Planetario
Limpieza	102 horas	Esmeril, Amoladora UPNA, cepillos, ceras para pulir, cepillos de mano, lijas
Pintado	6 horas	Brochas y pintura negra
1ª montaje tras restauración	8 horas	Herramienta del Planetario
1ª prueba tras restauración	10 horas	Herramienta del Planetario
Reparaciones de fallos en el mecanismo	12 horas	Herramienta del Planetario
Diseño de sistema de campanas	4 horas	Solid Works
Montaje de sistema de campanas	1 hora	Herramienta del Planetario
TOTAL	171 horas	

Tabla 3. Proceso de restauración y tiempos.

6.- UBICACIÓN DEFINIDA PARA EL RELOJ

Después de estar alrededor de 150 años en el Ayuntamiento de Iruñea, unos 25 años guardado en un local del Ayuntamiento y ser restaurado, había que tomar la decisión de dónde colocar el reloj. Estaba claro que iba a estar expuesto en el Planetario, pero, todavía había que resolver varias cuestiones.

6.1.- Elección de ubicación

La primera de todas era definir cuál iba a ser la **función del reloj**. Su función principal sería que los visitantes pudieran ver este tesoro artesano en marcha y poder ver su mecanismo, y a ser posible, que diera la hora. Para lograr lo primero bastaba con restaurar y poner a punto el reloj; para lo segundo, en cambio, surgieron otras dificultades. Como se ha comentado en el apartado de los elementos del reloj, el péndulo original debía tener una **longitud** de unos **3,6 m** para dar la hora con exactitud. Para lograr esto, habría que colocar el reloj a una gran altura o realizar un agujero en el suelo, lo cual no se podía, por ello, se tomó la decisión de que el reloj no diera la hora exacta, pero cumpliera su función principal.

Una vez tomada esta decisión el Planetario eligió la ubicación del reloj en el Planetario. Se colocará en la entrada principal como se puede ver en la figura 73. Para resguardarlo, pero poder verse, se colocará en una vitrina que permite su entrada para mantenimiento y dar cuerda. Esta estructura debe diseñarse todavía, pero una vez esté todo acabado se colocará ahí el reloj.

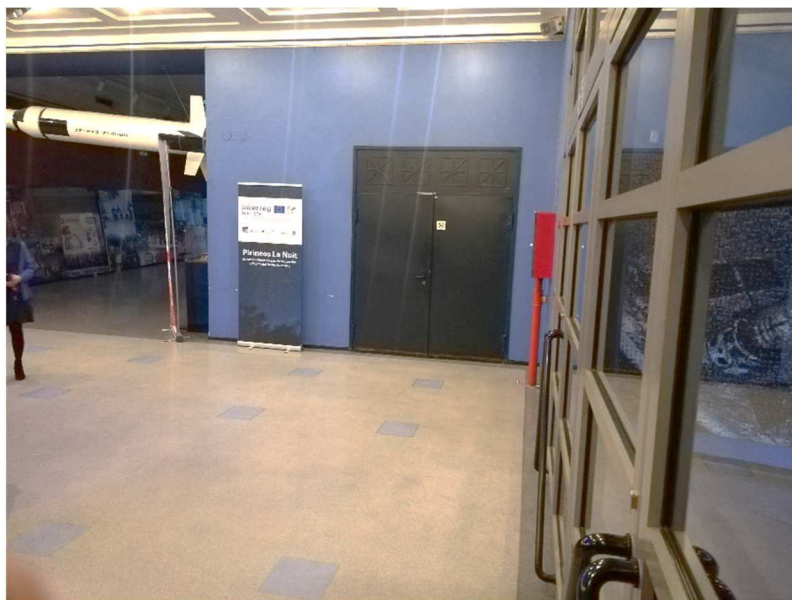


Figura 73. Entrada del Planetario, lugar donde se ubicará el reloj.

A la hora de elegir el tamaño de la vitrina se tuvo que tener en cuenta que el reloj podría precisar de mantenimiento, y que, al tratarse de un reloj mecánico sin un sistema electrónico una persona debería encargarse de entrar a darle cuerda.

Por otro lado, se decidió que la **campana** no sonará siempre; ya que, podría ser molesto para los trabajadores del Planetario. Por ello se decidió hacer desmontables las mazas que golpean a la campana. Las mazas están unidas a los actuadores mediante tornillos; en caso de no querer que suenen bastará con aflojarlas y ponerlas en una posición que no contacten con la campana. O simplemente soltar las cadenas.



Figura 74. Desmontaje para que no suene.

También se tomó la decisión de no colocar una **esfera** que diera horas y minutos. Esta decisión sigue la línea de lo mencionado anteriormente; las esferas tienen gran tamaño y taparía parte del reloj, además, habría que colocar un sistema de engranajes nuevo, todo esto dificultaría poder ver bien el mecanismo y funcionamiento del reloj. Como el reloj cuenta con la placa minuterá, se decidió prescindir de la esfera y utilizar únicamente esta placa para ver la hora.

6.2. – Longitud real del péndulo

Como se ha visto en el capítulo 4, la longitud que debería haber tenido el péndulo cuando estaba colocado en el Ayuntamiento de Pamplona es de 3.6m. Este valor tan grande para la longitud del péndulo era posible en su ubicación original; dado que al estar el reloj colocado en lo alto de una torre lo más probable es que contara con un agujero de gran profundidad del que colgara el péndulo. Por desgracia, en su nueva ubicación, el Planetario de Pamplona, será imposible darle al péndulo la longitud que requiere para dar las **horas** con **exactitud**. Para poder darle esta longitud habría que realizar un agujero en el suelo de gran profundidad o colocar el reloj a una gran altura. Estas dos opciones quedan descartadas; el objetivo de la restauración es que los visitantes puedan ver el funcionamiento del mecanismo del reloj y con esas soluciones esto sería complicado. Por esta razón, se decidió darle una menor longitud al **péndulo**, que será de **1,86 m**.

Con esa longitud el reloj no dará la hora correctamente; pero los visitantes tendrán la opción de ver el reloj en marcha y con vida de nuevo. Una vez elegida la longitud del péndulo, puede calcularse el nuevo tiempo de ciclo del reloj

realizando los cálculos anteriores en sentido inverso. El **periodo** con la nueva longitud será el siguiente:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{1,86 \text{ N}}{g}} = 2,7395 \text{ s} \quad (6.1)$$

Una vez conocido el periodo puede calcularse el número de dientes que tendrá por hora ese periodo. Por otro lado, teniendo en cuenta cuantos dientes por hora y que la rueda de escape tiene 30 dientes, podrá calcularse el número de vueltas que dará en una hora:

$$T = \frac{3600}{N_{\text{dientes/h}}} = 2,7395 \text{ s} \rightarrow N = 1314,1 \text{ dientes/h} \rightarrow 43,8 \text{ vueltas/h} \quad (6.2)$$

Con este último dato que se ha calculado y utilizando las relaciones de transmisión del tren de engranajes, se calculará la velocidad de la rueda minuterá:

$$\omega_{\text{prc1}} \times 56 = 42,8 \times 8 \rightarrow \omega_{\text{prc1}} = 6,257 \text{ vueltas/h} \quad (6.3)$$

$$\omega_{\text{rc1}} \times 72 = 6,257 \times 8 \rightarrow \omega_{\text{rc1}} = 0,6952 \text{ vueltas/h} \quad (6.4)$$

$$\omega_{\text{min}} \times 36 = 0,6952 \times 72 \rightarrow \omega_{\text{min}} = 1,3904 \text{ vueltas/h} \quad (6.5)$$

De modo que el tiempo que necesitará para dar una vuelta completa será el siguiente:

$$\frac{60}{\omega_{\text{min}}} = 43,9 \text{ minutos} \quad (6.6)$$

Como ya se había mencionado anteriormente, debido a la nueva longitud del péndulo por su nueva ubicación el mecanismo se moverá a mayor velocidad al acabar el proceso de restauración.

7.- DISEÑO DEL SOPORTE PARA LA CAMPANA

La campana original no se encontraba con el mecanismo del reloj en el local del Ayuntamiento donde se guardó después de quitarlo de la casa consistorial. La campana que se ha utilizado tras restaurar el reloj es una antigua campana de barco que consiguió y aportó para este proyecto Xabier Alvarez. Una vez obtenida la campana llegaba el momento de diseñar un soporte para ella y un sistema para hacerla sonar.

7.1.- Diseño inicial

El reloj restaurado no contaba con una estructura para sujetar la campana y los actuadores que la golpean. En su ubicación original en el Ayuntamiento de Iruñea, se puede suponer que el reloj contaría con una estructura fija para ello, la cual posiblemente siga utilizándose hoy en día. Es por ello que tuvo que diseñarse una estructura para la campana y un sistema de golpeo de campana completamente nuevos.

Inicialmente se barajaron **varias opciones**, funcionando todas ellas con poleas. Como puede verse en las siguientes imágenes se descartaron las opciones más invasivas y menos funcionales.

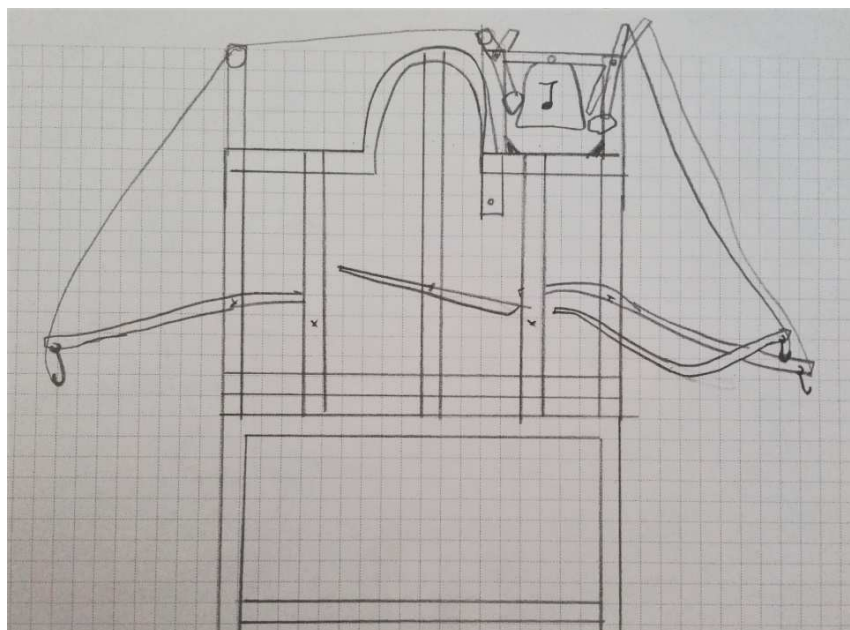


Figura 75. Alternativa 1.

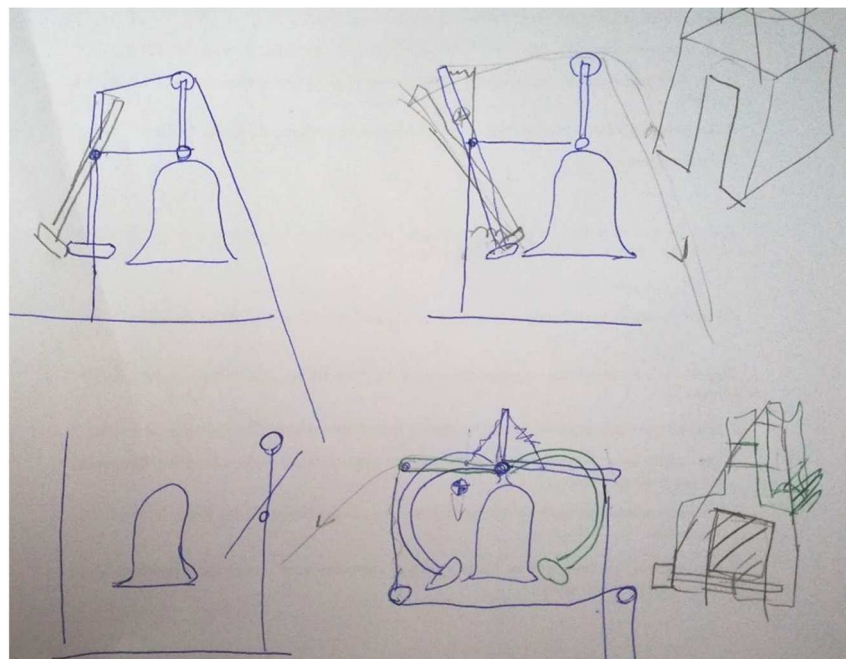


Figura 76. Alternativa 2.

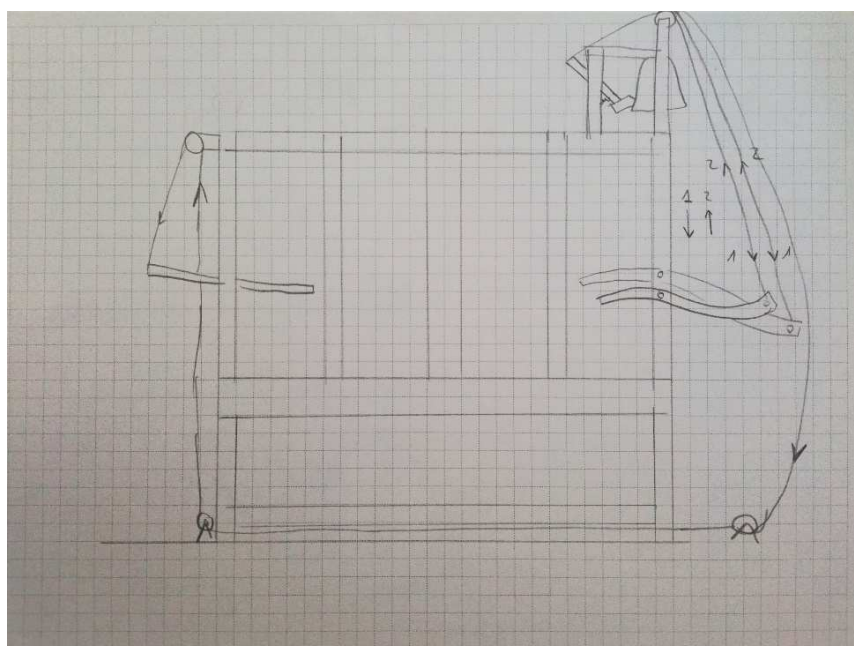


Figura 77. Alternativa 3.

Con todas las alternativas se realizó un **análisis** de estas para decidir que diseño se desarrollaría para implantarlo en el reloj. En la siguiente tabla puede verse resumido el proceso de selección de la alternativa.

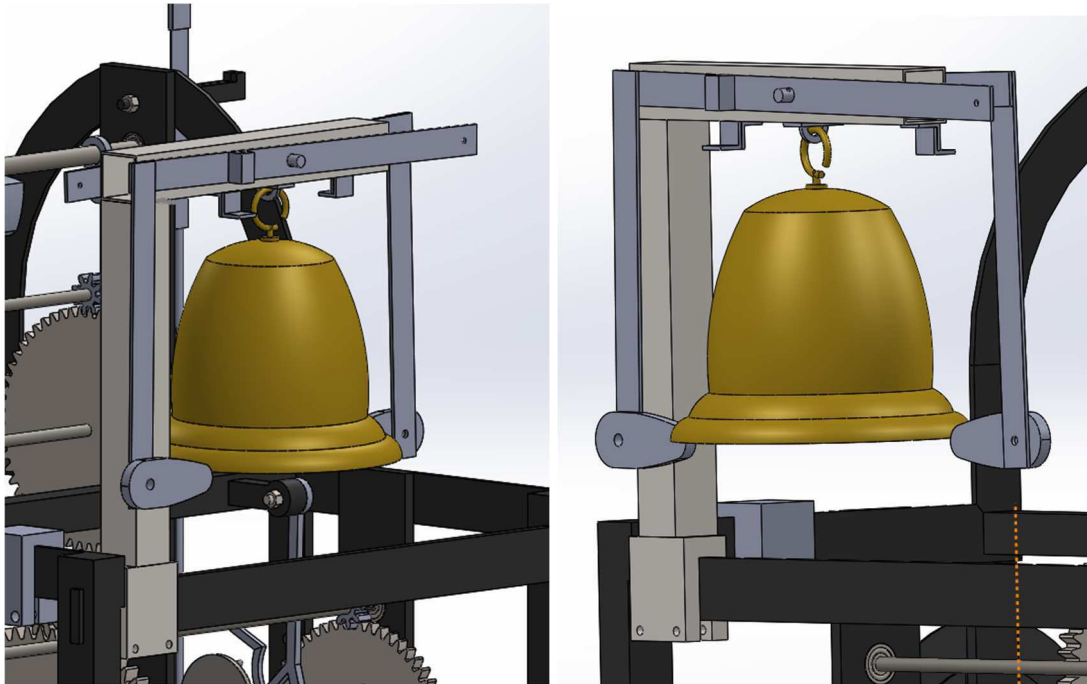
ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS			
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Descripción	La campana se sujeta mediante una estructura de barras de 4 patas. Los actuadores se activan mediante 2 poleas y cadenas. Todas las conexiones de las poleas van por la parte superior de la estructura. 3 actuadores de golpeo.	Soporte de campana en forma de L. 2 actuadores realizan el toque de campanas. Se usan poleas para la sonería de horas.	La campana se sujeta mediante una estructura de barras de 4 patas. Los actuadores se activan mediante 4 poleas y cadenas. Las conexiones van por debajo de la estructura. 3 actuadores de golpeo.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> · Soporte muy estable. · Gracias a las poleas se logra cargar la sonería de horas en la dirección correcta 	<ul style="list-style-type: none"> · La alternativa con un montaje más sencillo. · Pocos elementos. · Poco invasiva 	<ul style="list-style-type: none"> · Soporte estable. · Gracias a llevar las conexiones por debajo de la estructura es menos invasivo.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> · Demasiado invasivo. · Muchos actuadores 	<ul style="list-style-type: none"> · La alternativa menos rígida. · La dirección de carga de los actuadores de golpeo no es la ideal. 	<ul style="list-style-type: none"> · Más compleja que las otras alternativas. · Demasiados elementos.
Alternativa escogida	La alternativa escogida fue la segunda. Es la menos invasiva y la más funcional y supone un ahorro considerable de piezas.		

Tabla 4. Análisis de alternativas.

Como puede observarse, la alternativa escogida para ser desarrollada fue la segunda. Una vez seleccionada esta idea, se realizó un primer diseño en Solid Works (fig.78), más detallado y con todos los componentes que debía tener.

El diseño final, fabricado en los **talleres de la Universidad Pública de Navarra**, consiste en 2 perfiles soldados en forma de L para sujetar la campana, con un eje

donde se colocarán los actuadores contruidos con chapas finas y un mecanismo que evitará el rebote al golpear la campana.



Figuras 78. Diseño virtual del soporte de la campana.

Los perfiles tienen una sección de 40 x 40 x 2 mm y la chapa un espesor de 3 mm. En los planos adjuntos en los anexos puede verse todas las medidas del diseño. Todas las piezas son de acero, excepto las poleas, que fueron compradas en la ferretería Irigaray.

La figura 79 muestra una imagen del conjunto de piezas diseñadas con su numeración.

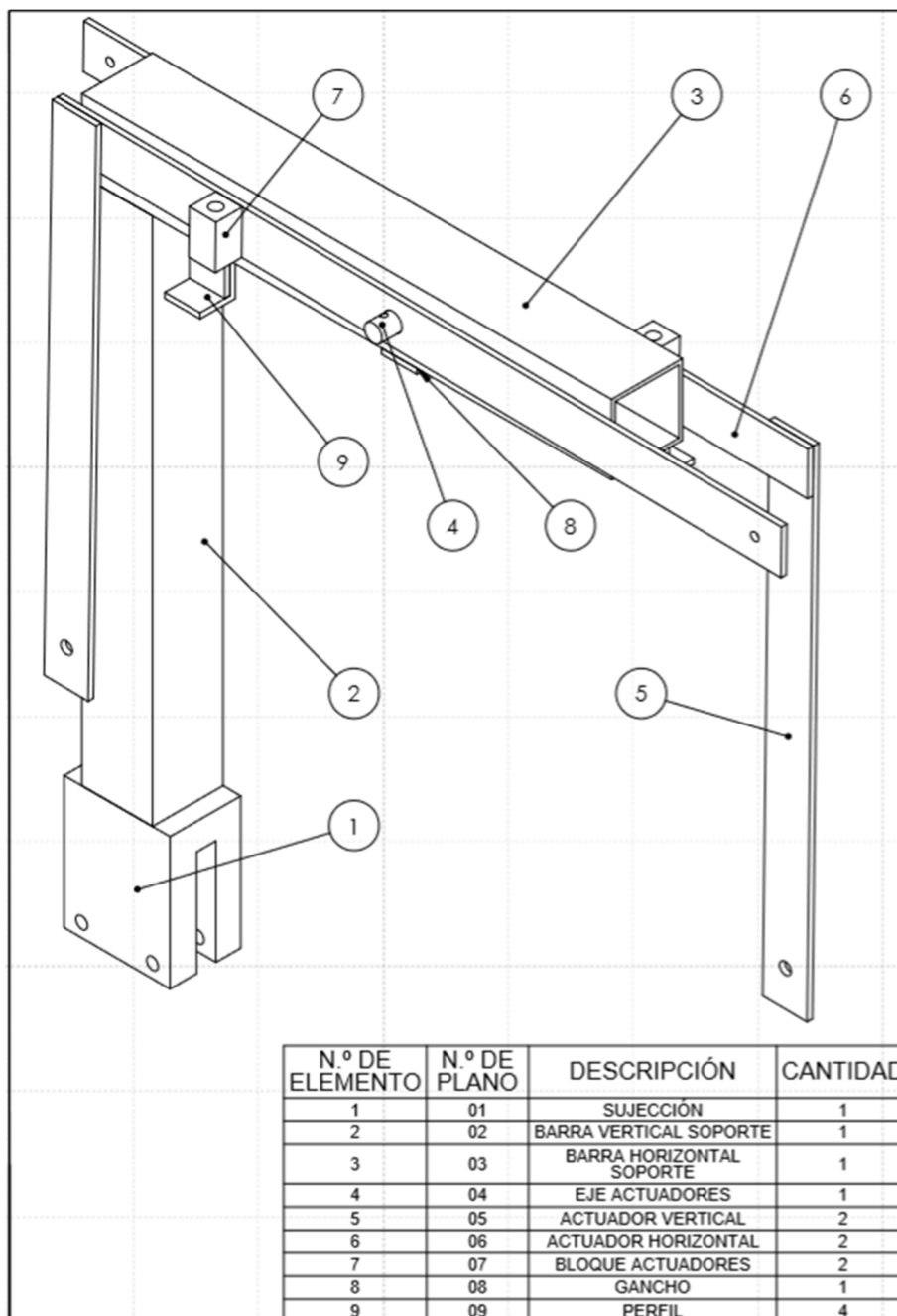


Figura 79. Plano y tabla con piezas del soporte.

La pieza número **1** es la que unirá la estructura de sujeción de la campana a la estructura del reloj. Para ello cuenta con 2 agujeros para unirla a la estructura mediante pernos sin tener que agujerear la estructura original del reloj.

Las piezas **2 y 3** son los perfiles que forman la L que sujeta la campana. Soldados entre sí y a la sujeción, soportarán el peso de la campana y las mazas de golpeo. La barra horizontal tiene un agujero donde irá el eje de los actuadores.

La número **4** es el eje donde irán los actuadores –piezas **5 y 6**– que efectuarán el golpeo de campana. Este eje tiene dos agujeros simétricos; en ellos se colocarán

pasadores que bloquearán el eje y evitarán que se salga del agujero de la barra horizontal.

La pieza número **7** irá soldada a los actuadores y en ella se introducirá un tornillo que, al efectuar el actuador el golpeo de la campana golpeará a la pieza 9 y evitará el exceso de rebotes. Esto es importante para lograr un sonido adecuado al golpear a la campana.

Por último, la pieza **8** servirá para colgar la campana de ella.

Para colocar las poleas se planteó diseñar dos piezas similares al número 1 que anclaba la L a la estructura del reloj. Varios actuadores no necesitan poleas; ya que, pueden unirse directamente a los actuadores de golpeo de campana; como son los de la sonería de cuartos. Para transmitir el movimiento del actuador de la sonería de horas, en cambio, es necesario utilizar 2 poleas. Estas poleas transmiten el movimiento desde el lado derecho del reloj hasta el lugar donde se ubica la estructura de la campana.

De este modo, cuando uno de los actuadores de las sonerías se cargue por el movimiento transmitido por las ruedas del sistema de engranajes, transmitirá su movimiento a los actuadores de golpeo directamente o mediante las poleas y estos golpearán la campana.

7.2.- Geometría de las piezas

En este capítulo puede verse las medidas de las piezas que fueron diseñadas y fabricadas posteriormente en los talleres de la Universidad.

Soporte

Formado por dos barras hechas con perfiles de 40x40 soldadas entre sí, deberá soportar el peso de la campana y las mazas.



Figura 80. Geometría barra vertical

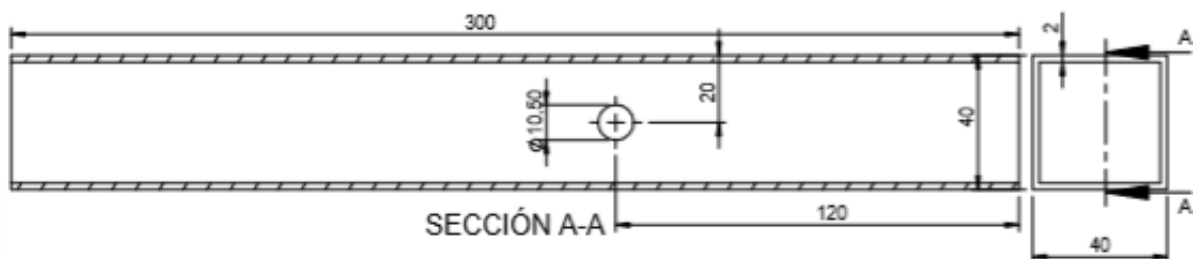


Figura 81. Geometría barra horizontal

Actuadores

De la misma forma que el soporte; los actuadores están formados por dos barras soldadas entre sí. Siendo la barra horizontal más larga que la vertical.

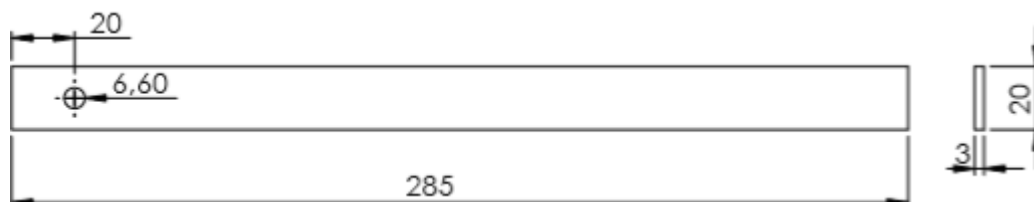


Figura 82. Geometría actuador vertical.

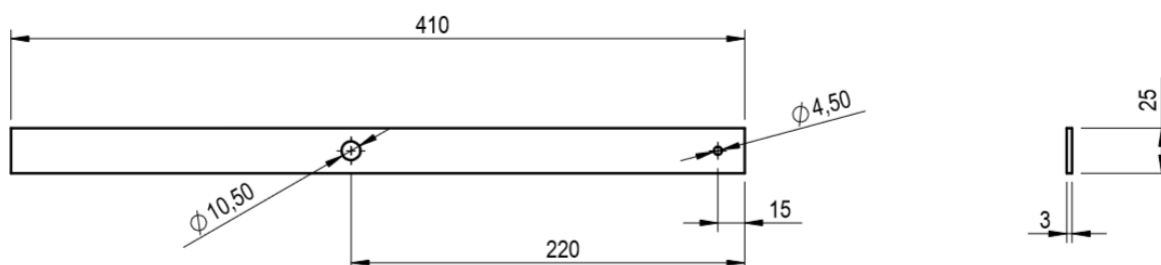


Figura 83. Geometría actuador horizontal.

Elementos anti-rebote

Estos elementos son la clave para un sonido óptimo de la campana. Son piezas simples pero cumplen perfectamente su propósito.

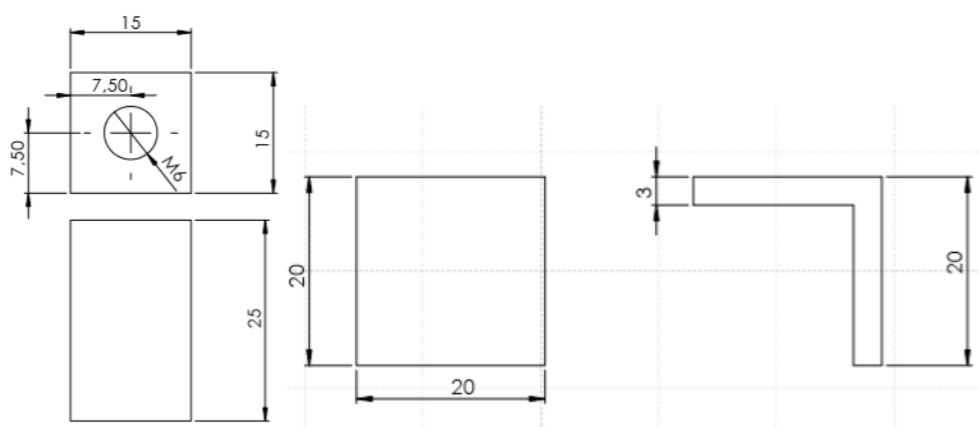


Figura 84. Geometría elementos anti-rebote.

7.3.- Factor de seguridad del soporte de la campana

Como se ha mencionado anteriormente, fue necesario diseñar una estructura para la campana. Esta estructura consta de un soporte y varios actuadores que serán los encargados de realizar los golpes de campana.

A la hora de realizar el diseño había que asegurar que la estructura aguantaría sin problemas el peso de la campana y las pesas; por eso, en este apartado se calcula el factor de seguridad del soporte de la campana. Para ello se realiza un cálculo estático, sabiendo que el perfil que se utilizará es de 40 x 40 x 2 mm.

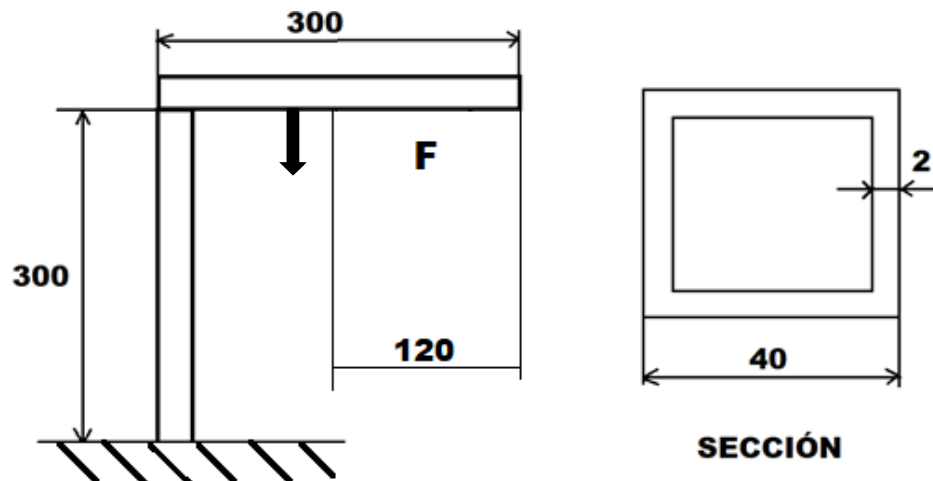


Figura 85. Esquema del soporte con medidas y fuerza aplicada.

Para poder realizar los cálculos es necesario tener cierta información; como son el peso de la campana y las pesas o la resistencia del material (S_y), que en este caso es el acero:

$$S_y = 200 \text{ MPa}$$

$$\text{Peso campana} = 1,98 \text{ kg}$$

$$\text{Peso pesas} = 2 \cdot 0,28 \text{ kg} = 0,56 \text{ kg}$$

Con los pesos de la campana y las pesas puede calcularse la fuerza que ejercerán sobre la estructura:

$$F = m \cdot g = (1,98 + 0,56) \cdot 9,81 = 24,91 \text{ N} \quad (7.1)$$

Conociendo esta fuerza y la distancia hasta el punto de aplicación se calcula el momento:

$$\vec{M}_0 = \begin{Bmatrix} 180 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \wedge \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -F \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -180F \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (7.2)$$

$$|M_0| = 180 \cdot F = 4483.8 \text{ Nmm} \quad (7.3)$$

La tensión que deberá soportar el soporte se calculará mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{M_o \cdot C}{I} = \frac{M_o}{M} \quad (7.4)$$

Como la sección es un rectángulo hueco:

$$W_z = (b \cdot h) \cdot e + \frac{b^2 \cdot e}{3}, \text{ y como en este caso } b = h \rightarrow W_z = \frac{4 \cdot b^2 \cdot e}{3} \quad (7.5)$$

$$W_z = \frac{4 \cdot 40^2 \cdot 2}{3} = 4266,67 \text{ mm}^3 \quad (7.6)$$

Y con ese dato la tensión que soportará será:

$$\sigma = \frac{4483,8 \text{ Nmm}}{4266,67 \text{ mm}^3} = 1,05 \text{ MPa} \quad (7.7)$$

Con este valor de la tensión ya puede calcularse el factor de seguridad para el soporte de la estructura:

$$n = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{200 \text{ MPa}}{1,05 \text{ MPa}} = 190.3 \quad (7.8)$$

Como puede verse y tal como era de esperar, el soporte aguantará con facilidad el peso de la campana y las pesas, por lo que, no habrá que preocuparse por posibles roturas. De hecho, desde el punto de vista estructural está sobredimensionado, pero los perfiles 40x40 eran los que estaban disponibles entre el material del que disponía la UPNA.

7.4.- Fabricación del soporte

Como ya se ha comentado con anterioridad, el soporte se fabricó en los talleres de la Universidad. Para ellos se soldaron varias piezas realizadas con perfiles y chapas. Una vez realizado el soporte, al realizar una primera prueba, se pudo comprobar que colocando la campana como se había pensado al ser golpeada **rebotaba** y golpeaba de nuevo a la maza. Esto ocurría debido al modo en el que se colocó el enganche de la campana; por eso, se decidió cambiar la pieza “gancho” por una que evitara esos movimientos de la campana.



Figura 86. Primera versión del soporte fabricado.

En esta nueva versión la campana está unida al soporte mediante un cilindro macizo que le aporta una gran rigidez evitando así el rebote.



Figura 87. Versión 2 del soporte.

Una vez fabricado el soporte, se volvieron a realizar pruebas de funcionamiento; esta vez incluyendo estas nuevas piezas. Para estas pruebas se compraron varias **argollas** y **uniones en S** y una **cadena** de 4 metros para poder unir los actuadores del mecanismo a los nuevos.

En estas primeras pruebas se comprobó que era necesario añadir un elemento más para ayudar al actuador a golpear la campana. En primera instancia se planteó el diseño pensando que, después de cargar, el actuador de golpeo podría volver por la

inercia del peso de la maza y golpear la campana. Al montarlo y probar, se vio que no era suficiente y por eso habría que añadir otro elemento.

Lo primero que se probó fue a añadir una **goma** uniendo las piezas 7 y 9. Al cargarse la goma se estira quedando en tracción; cuando el actuador de la sonería pase por completo el pivote de la rueda primera, la goma volverá a su **posición de reposo** inicial obligando así a realizar el toque de campana.



Figura 88. Pruebas con la goma.

Añadir una goma desentonaba bastante con un mecanismo como este; realizado en el siglo XIX y el cual está formado casi en su totalidad por piezas metálicas. Por este motivo se decidió cambiar la goma por un **muelle**. Este muelle realizará exactamente la misma función que la goma; pero, es un elemento más acorde con la estética del reloj.



Figura 89. Muelle en posición de reposo (Izq.) y de carga (Drcha.).



Figura 90. Imágenes detalladas del muelle en carga (Izq.) y reposo (Drcha.)

8.- RECONSTRUCCIÓN VIRTUAL DEL RELOJ

Siendo uno de los objetivos del proyecto el de difundir el valor histórico y tecnológico del reloj, el diseño virtual es una herramienta muy valiosa para lograrlo. Este diseño se ha realizado utilizando el programa de diseño **Solid Works**.

Para poder realizar este diseño virtual, el primer paso fue la toma de medidas de todas las piezas que conforman el reloj. Algunas partes han sido simplificadas para agilizar el proceso de diseño y poder trabajar mejor con el programa.

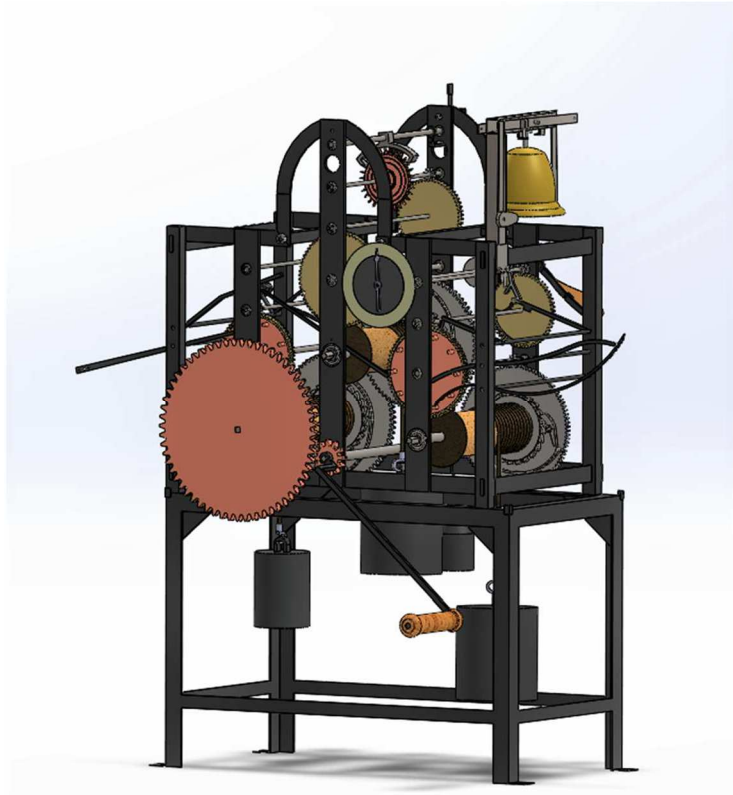


Figura 91. Reconstrucción virtual del reloj con sistema de dar cuerda.

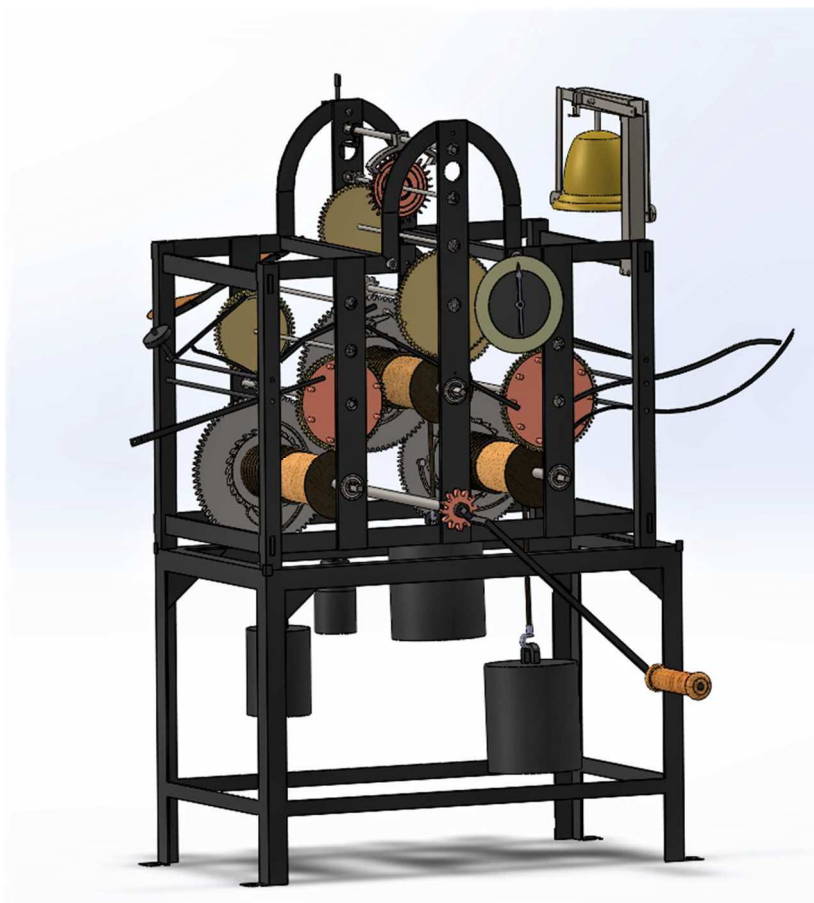


Figura 92. Reconstrucción virtual del reloj sin sistema de dar cuerda.

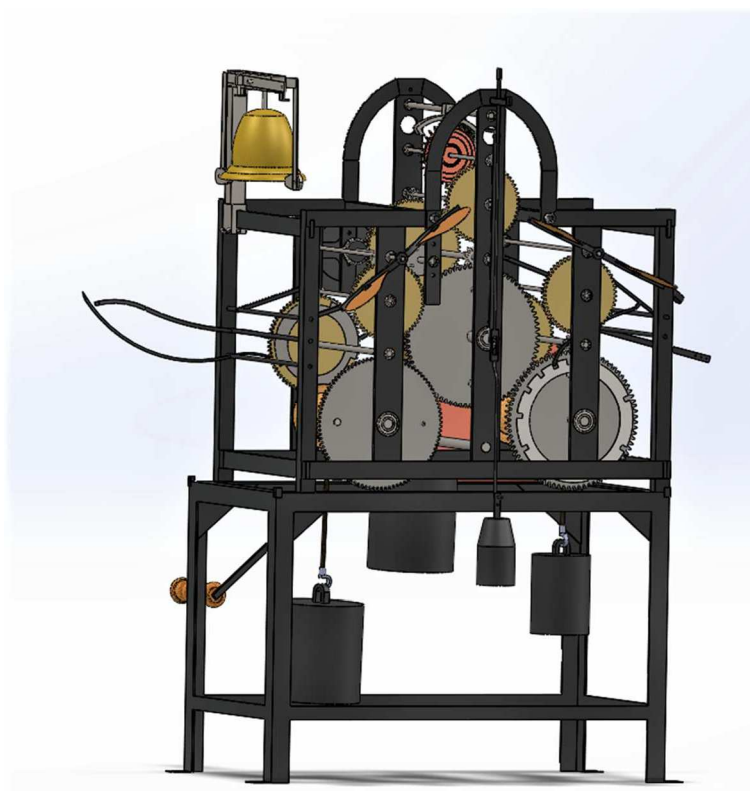


Figura 93. Reconstrucción del reloj trasera.

Los engranajes han sido añadidos utilizando el **toolbox** del programa; ya que, dispone de **ruedas normalizadas**. Las ruedas del reloj real no están normalizadas y por eso han tenido que recalcular las medidas entre centros de los trenes de engranajes. Para realizar los cálculos se ha utilizado la siguiente tabla:

	Movimiento					
	modulo	distancia entre centros real	z	radio	distancia entre ejes diseño	Diferencia
imperial	4,5	200	80	180	202,5	2,25
piñon prim	4,5		10	22,5		
r.prim	3,5	130	72	126	140	10
piñon seg	3,5		8	14		
r.seg	3,5	105	56	98	112	7
piñon escap	3,5		8	14		
r.escap	3,5		30	52,5		

Tabla 5. Cálculo distancia entre ejes.

Lo que se ha hecho en esta tabla es lo siguiente. Fijando el módulo de las ruedas por pares (las que engranan entre sí), se calcula el radio teórico de cada una de ellas suponiéndolas normalizadas. Después, con los radios, se calcula la distancia entre centro, y con la medida real medida en el reloj se calcula la diferencia. Jugando con los módulos se ha ajustado las distancias lo máximo posible logrando encajar todas las ruedas y que puedan engranar entre sí.

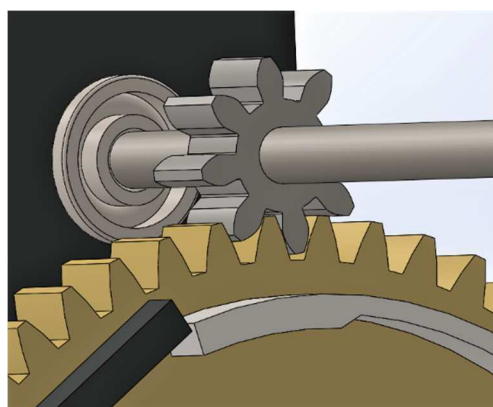


Figura 94. Ruedas engranando.

Lo más complicado ha sido realizar las piezas con geometrías más complejas y lograr que encajaran entre ellas. Las **posiciones críticas** del reloj como son los bloqueos o el toque de campanas se muestran a continuación.

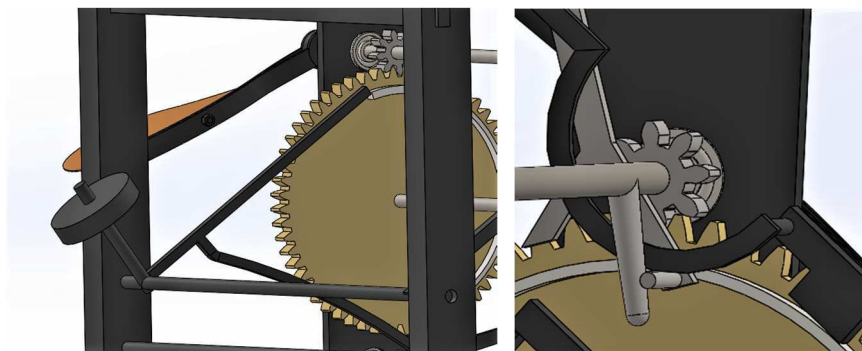


Figura 95. Bloqueos.

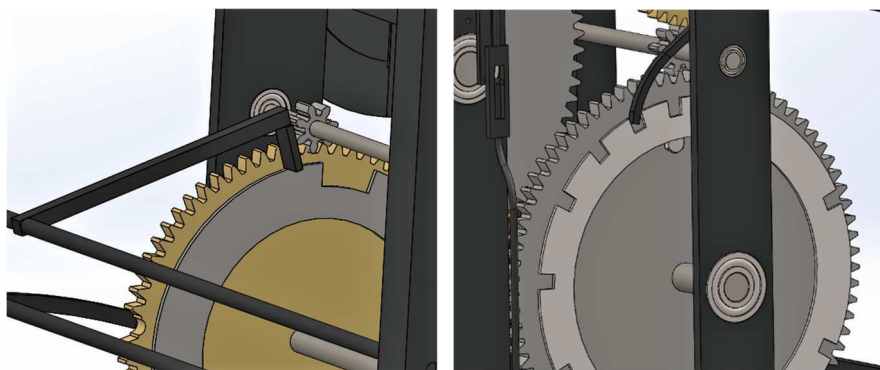


Figura 96. Caracolas.

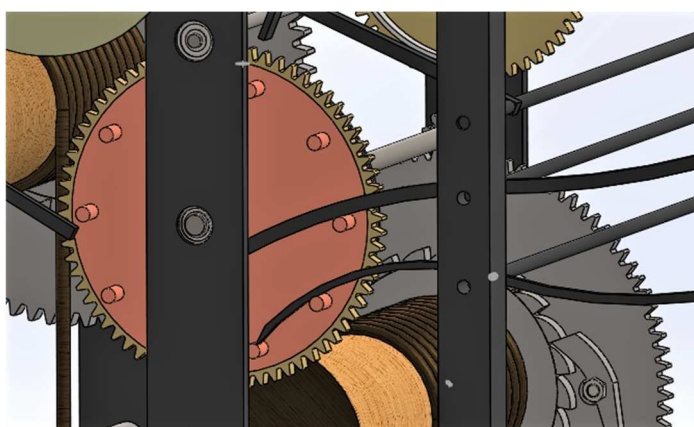


Figura 97. Pivotes y actuadores de sonería.

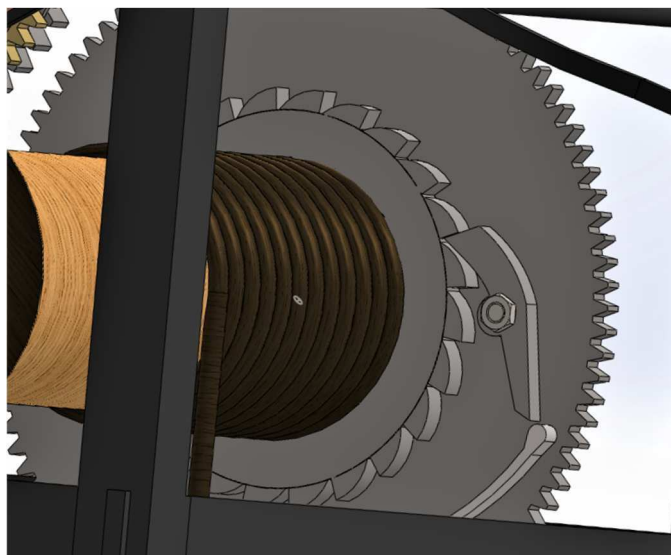


Figura 98. Rueda trinquete, uña y fleje.

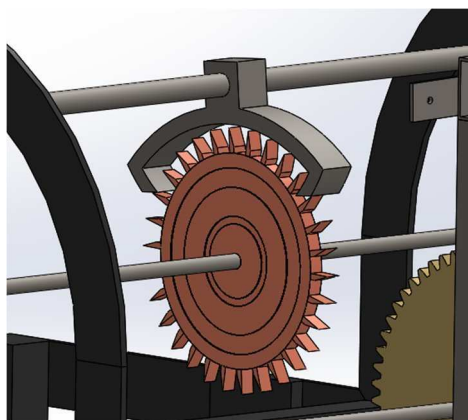


Figura 99. Rueda de escape y áncora.

Esta reconstrucción virtual sirve para cumplir el objetivo de **difusión** del **legado histórico y tecnológico** de estos mecanismos de precisión. También es un claro ejemplo de cómo pueden mezclarse pasado y presente para trabajar conjuntamente y dar valor a los trabajos ingenieriles de antes y ahora.

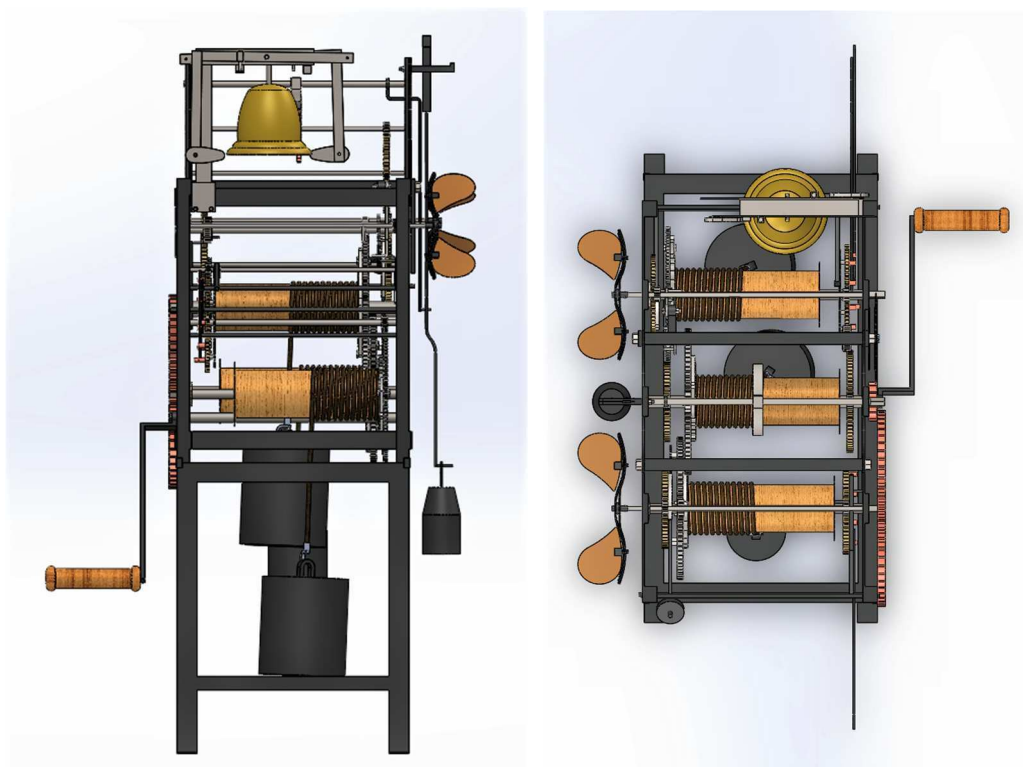


Figura 100. Vista lateral y superior de la reconstrucción.

En estas últimas imágenes pueden apreciarse con mayor detalles piezas como la manivela, los **venteroles** o el **péndulo**. Como puede observarse, se ha tratado de asemejar la reconstrucción lo máximo posible al estado actual del reloj. Esto puede verse en piezas como la agarradera de la manivela, el soporte para la campana o la longitud del péndulo.

9.- PRESUPUESTO

En este capítulo vienen recogidos todos los gastos asociados al proceso de restauración. Las compras consistieron en material para la limpieza de las piezas del reloj, elementos para las pruebas, piezas para el sistema de la campana y equipos de protección individual de seguridad. En la siguiente tabla puede verse desglosado el presupuesto completo.

PRESUPUESTO			
FERRETERÍA IRIGARAY			
"SEPTIEMBRE 2018"			
	CANTIDAD	PRECIO	PRECIO (IVA)
FACOM 257.G PUNZON AUTOMATICO CON VAINA	1	64,957	76,42
SIRGA	1	9,384	11,04
	TOTAL	74,341	87,46
03/10/2018			
	CANTIDAD	PRECIO	PRECIO (IVA)
TO 0600GM14 TAZA 60 MM ACERO LATONADO ONDULADO 0,40	1	8,95	10,526
HSD 0085EM14 CEPILLO HS 85 MM ALTA REVOLUCION LATONADO 0,30	1	11,53	13,562
HSP 0115EM14 CEPILLO HS 115 MM ALTA REVOLUCION LATONADO 0,30	1	11,51	13,536
MJ 4015 CEPILLO MANUAL LATON 230*20 MM 4 HILERAS JOYERO	1	3,91	4,605
MJ 5015 CEPILLO MANUAL LATON 230*24 MM 5 HILERAS JOYERO	1	4,58	5,391
	TOTAL	40,48	47,62
18/10/2018			
	CANTIDAD	PRECIO	PRECIO (IVA)
CT 2006G99 CEPILLO CIRCULAR 200 MM 6 HILERAS LATONADO 0,4	1	19,68	23,151
8730 750 ML 404 NEGRO PAVONADO ESMALTE FORJA GRANO FINO	1	13,77	13,765
HOJA LIJA SOPORTE TELA SHEET 230*280 MM A-B01 CJJ 220 20844	2	1,25	0,736
HOJA LIJA SOPORTE TELA SHEET 230*280 MM A-B01 CJJ 400 20868	2	1,25	0,736
HOJA LIJA SOPORTE TELA SHEET 230*280 MM A-B01 CJJ 320 20861	2	1,25	0,736
8730 750 ML 404 NEGRO PAVONADO ESMALTE FORJA GRANO FINO	1	13,77	13,765

RESTAURACIÓN DEL ANTIGUO RELOJ DEL AYUNTAMIENTO DE PAMPLONA

BATA CABALLERO AZULINA TALLA 50 P-4 TERGAL	1	14,48	17,032
BATA CABALLERO AZULINA TALLA 52 P-4 TERGAL	1	14,48	17,032
	TOTAL	79,93	86,953
30/04/2019	CANTIDAD	PRECIO	PRECIO (IVA)
POLEA 12 ZINCADA TORNILL ROLDANA 039 MM 1565	2	2,346	2,76
CONTRA CUADRADA INTERIOR ESTIRADA MOD.15 40*40 44903	2	0,374	0,44
	TOTAL	2,72	3,2
		SIN IVA	CON IVA
TOTAL FERRETERIA IRIGARAY		197,471 €	225,233 €

Tabla 6. Gasto en ferretería Irigaray.

PRESUPUESTO			
LEROY MERLIN			
03/10/2018	CANTIDAD	PRECIO	PRECIO (IVA)
ACEITE MOTOR 4 TIEMPOS BELLOTA 12698385	1	4,38	5,85
10 MASCARILLAS PLEGABLES FPP1 80153427	1	4,92	5,95
GAFAS PROTECCIÓN 18391702	3	4,2	5,1
GUANTES DEXTER POLIURET GRIS T10 TACTIL 18365473	1	1,89	2,29
GUANTES DEXTER POLIURET GRIS T19 TACTIL 18371451	1	1,89	2,29
GUANTES DEXTER POLIURET GRIS T11 TACTIL 18371276	1	1,89	2,29
GUANTES DEXTER NITRILO AZUL TACTIL T9 18371892	1	2,47	2,99
BOLSA MEDIANA REUTILIZABLE 15 USOS 15225623	1	0,07	0,08
CINTA PINTOR DEXTER 50MX38MM 17235386	2	4,78	5,78

RESTAURACIÓN DEL ANTIGUO RELOJ DEL AYUNTAMIENTO DE PAMPLONA

BROCHA PLANA ECONOMICA UNIVERSAL 20 MM 17868340	2	0,58	0,7
LIMPIA COBRE - LATON - BRONCE STARWAX 250 ML 14662956	1	7,11	8,6
BROCHA PLANA ECONOMICA UNIVERSAL 40 MM 17868333	2	1,08	1,3
BARNIZ METALES TITAN 250 ML INC 11734254	1	5,74	6,95
TOTAL		41,00 €	50,17 €

Tabla 7. Gasto en Leroy Merlin.

PRESUPUESTO			
HIPER Z-ONE			
15/05/2019	CANTIDAD	PRECIO	PRECIO (IVA)
ARANDELA 125 INOX	1	3,318	4,2
GANCHOS DE METAL	1	0,711	0,9
TORNILLO + TUERCA 6	1	0,474	0,6
ARGOLLAS PARA LLA	1	1,106	1,4
	TOTAL	5,61 €	7,1 €

Tabla 8. Gasto en Hiper Z-ONE.

PRESUPUESTO		
	SIN IVA	CON IVA
TOTAL FERRETERIA IRIGARAY	197,471	225,233
TOTAL LEROY MERLIN	60,36	73,58
TOTAL HIPER Z-ONE	5.61	7.1
SEGURO DEL PLANETARIO	231.34	279.92
TOTAL	494.78 €	585.83 €

Tabla 8. Gasto total.

El presupuesto no es más elevado gracias a la labor de los técnicos de la Universidad y al aporte de material y herramientas de varios voluntarios. De no ser así, el gasto habría sido considerablemente mayor.

10.- CONCLUSIONES

La restauración del antiguo reloj del Ayuntamiento de Iruñea, fabricado en 1827, se ha llevado a cabo con éxito y ya está en marcha y con “vida” de nuevo. Esto quiere decir que el objetivo principal del proyecto ha sido cumplido.

Para llevar a cabo la restauración, se ha coordinado un equipo de trabajo formado por personas que han trabajado de forma voluntaria en la restauración del reloj.

Se ha tenido que modificar la longitud del péndulo para su nueva ubicación. Esto implica que el reloj no dará la hora exacta; ya que, el periodo del péndulo está directamente relacionado con su longitud. Esta decisión se tomó para que el mecanismo pueda estar a una altura accesible, que permita a los visitantes al Planetario poder verlo de cerca y entender mejor su funcionamiento. Una hora del reloj será equivalente a 43,9 minutos reales y al no aumentar su altura su tiempo de funcionamiento será de alrededor de 12,5 horas. Este tiempo es suficiente y dar cuerda al reloj solo será necesario una vez al día o cuando lo estimen oportuno en el Planetario para enseñárselo a las visitas. Para evitar un ruido excesivo, las mazas que golpean a la campana son desmontables, logrando así que la campana solo suene cuando haya visitas o lo vean oportuno.

Para poder poner en marcha el reloj fue necesario diseñar y conseguir varias piezas, debido a que, elementos importantes del reloj original como son las pesas, la campana o las mazas que la golpean no se encontraban con él. Se hanseleccionado pesas de 120 y 60 kg para los mecanismos de sonería y de 100 kg para el de movimiento.

Los venteroles tuvieron que ser restaurados para disminuir su rigidez. Se habían visto afectados por el paso de los años y al frenar los trenes de engranajes frenaban con demasiada brusquedad. Para lograr que funcionen adecuadamente, se aflojaron, limpiaron y engrasaron logrando así un funcionamiento más suave y menos dañino para los ejes.

Varias piezas se encontraban dobladas, probablemente por el paso de los años y posibles golpes que haya podido sufrir el reloj en un pasado. Estos elementos son los encargados de bloquear y desbloquear la sonería de horas y para poder hacer que funcionaran correctamente fue necesario enderezar varias piezas que forman este sistema de activación.

Por otro lado, se realizó un diseño para el sistema de soporte de la campana y los actuadores que mueven las mazas que efectuarán el toque de campanas. Este diseño esta formado por varias piezas metálicas, muelles y alambre que servirá de conexión entre los actuadores del reloj y los de este sistema.

Para poder llevar a cabo este proyecto fue necesario estudiar con detenimiento el funcionamiento del reloj y documentarse sobre este tema. Una vez obtenida la

suficiente información fue necesario realizar una serie de cálculos. Se ha calculado el periodo teórico del péndulo original, el tiempo mecánico con la nueva longitud, el tiempo de funcionamiento y el factor de seguridad del soporte de la campana. Estos cálculos han servido por un lado para entender mejor el funcionamiento del reloj original, y por otro, para definir los parámetros en su nueva ubicación.

También se ha realizado una reconstrucción virtual del reloj. Mediante esta reconstrucción se pretende ayudar a la divulgación de esta obra de artesanía e ingeniería y dar valor a mecanismos tan complejos como podían serlo los relojes de torre en el siglo XIX.

Hay que destacar que el objetivo del proyecto no era solo restaurar el reloj, sino que, esta restauración debía ser no invasiva. Por este motivo en todo momento se ha tratado de mantener los elementos originales del reloj, y en el caso de añadir nuevos, respetar la estética y los materiales originales y añadir el menor número posible.

Una vez restaurado y puesto en marcha el reloj, es importante destacar la importancia de dar valor a este tipo de tesoros ingenieriles históricos. Encontrar información sobre antiguos mecanismos, y sobre este reloj en particular para el proyecto, ha sido una tarea difícil. La información que hay es escasa y muchas veces resulta complicado encontrar información de calidad. Por eso, recuperar el legado histórico de las máquinas y los mecanismos y dar a conocer su impacto en el ámbito técnico y cultural es de gran importancia. Ese era uno de los objetivos de este proyecto y de la asociación Yeregui Elkarte, y el trabajo realizado servirá para poder lograrlo.

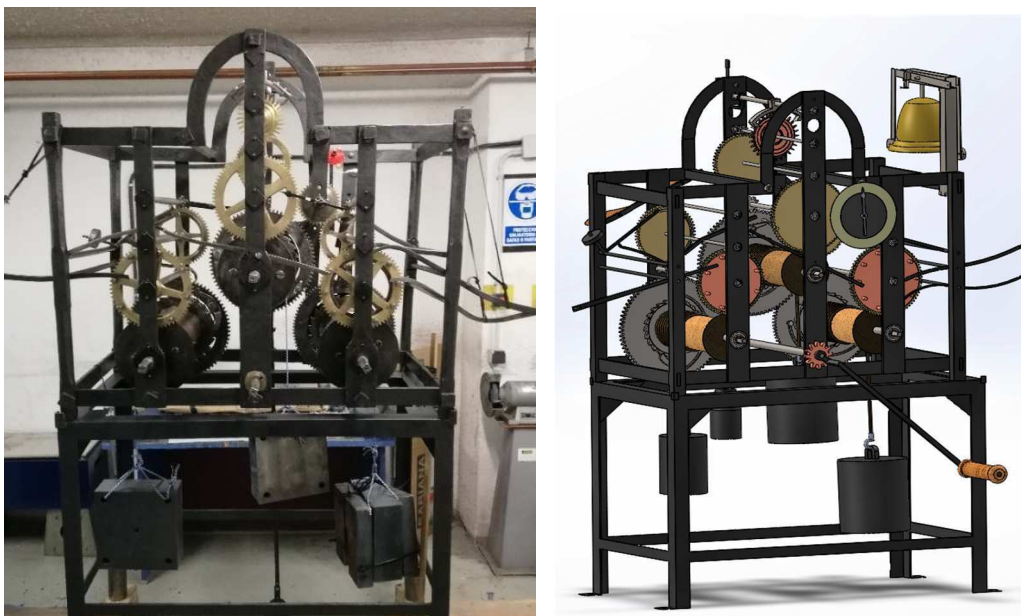


Figura 101. Reloj restaurado (Izq.) y reconstrucción virtual (Drcha.).

Fruto del trabajo realizado, se ha publicado un artículo en el congreso Ikergazte celebrado en Baiona en mayo de 2019.

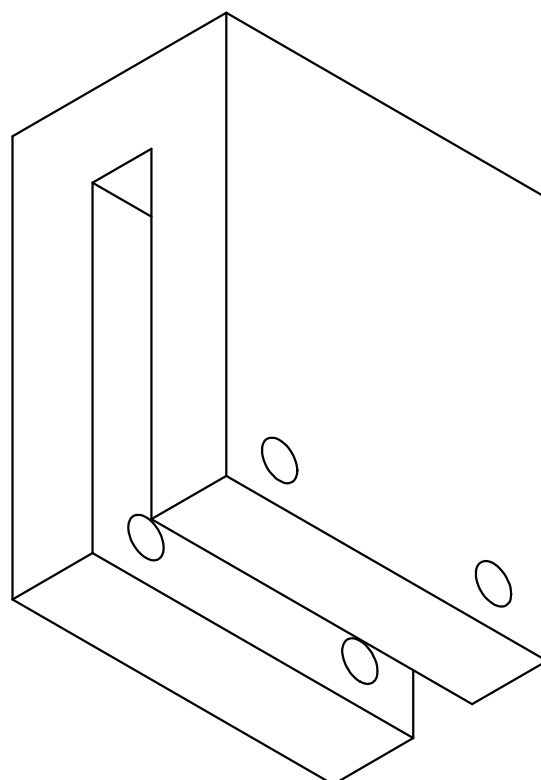
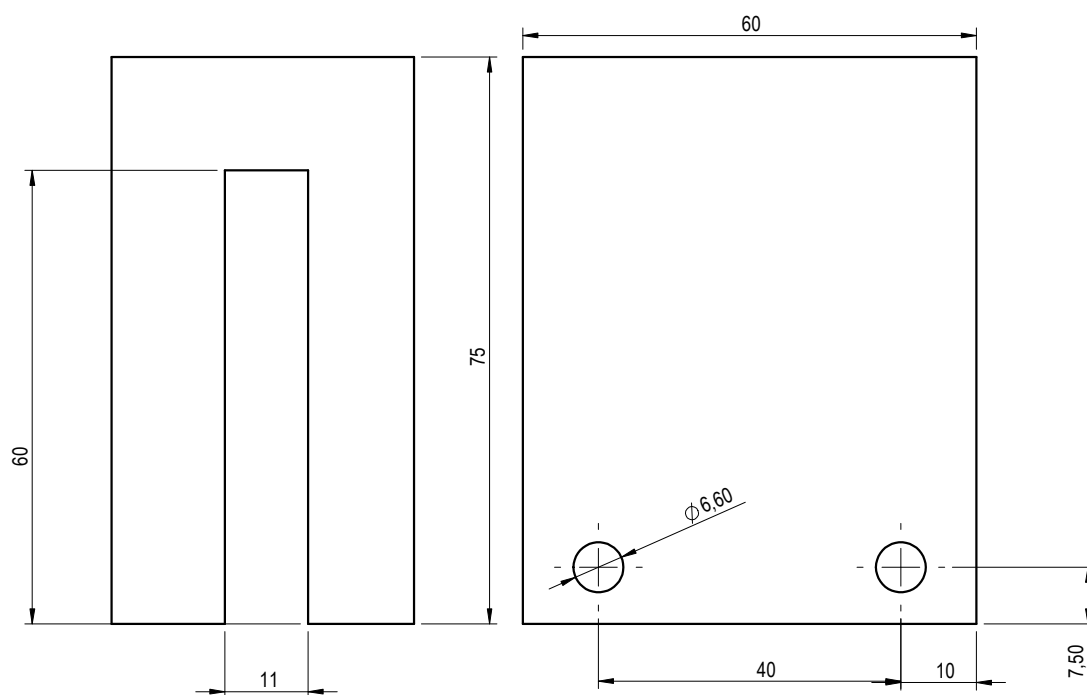
Desafortunadamente, en el plazo del TFG no se ha podido finalizar las 2 últimas tareas. Por un lado, el diseño de unas pesas con un componente estético mayor que las actuales y, por otro, colocar el sistema de poleas para actuar la sonería de horas. Se tiene intención de finalizar estas tareas tan pronto como sea posible.

11.- BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Ceccarelli, "On the IFToMM Permanent Commission for History of MMS", *In Proceedings of the International Symposium on History of Machines and Mechanisms*, pp.11-26, 2004.
- [2] H-S. Yan, y K-H. Hsiao, "Reconstruction design of the lost seismoscope of ancient China", *Mechanism and Machine Theory*, no.42, pp.1601-1617, 2007.
- [3] J. Aginaga García, V. Pérez de Ciriza Gárriz, A. Plaza Puértolas, y J.M. Pintor Borobia, "Nuevas Tecnologías aplicadas a la difusión de Mecanismos Históricos: Impresión 3D delArtificio de Juanelo Turriano", *In XXI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, 436-443, 2016.
- [4] J. Ortega Maya, "Relojes de sol: un estudio analítico con ejemplos de la ciudad de Úbeda (Jaén)", *SUMA*, no.40, pp.75-85, junio 2002.
- [5] A-A. Mills, S. Day and S. Parkes, "Mechanics of the sandglass", *European Journal of Physics*, v.17. no.3, 1996.
- [6] J.M. Merino y R. Merino, "La medida del tiempo I: relojes clásicos", *Revista de Ciencias*, no.4, pp.11-21, abril 2014.
- [7] V. Pérez Álvarez, V. "The role of the mechanical clock in medieval science", *Endavour*, v.39, no.1, pp.63-68, 2015.
- [8] M. Stoimenov, B. Popkonstantinović, L. Miladinović y D. Petrović, "Evolution of Clock Escapement Mechanisms", *FME Transactions*, v.40, no.1, pp.17-23, 2012.
- [9] R. Doerfler, "The (Not So) Simple Pendulum", *Dead Reckonings: Lost Art in the mathematical Sciences*, diciembre 2008.
- [10] John Harrison, Wikipedia
- [11] O. Irureta Azkune, "Erlojuak", *Elhuyar aldizkaria*, pp.54-55, 1996.
- [12] J. Garmendia Larrañaga, "Artesanos relojeros", *Cuadernos de Etnología y Etnografía de Navarra*, no.192, pp.45-56, 1970.
- [13] A. Hueso Perez, "Maquinaria del reloj de la casa consistorial", *Informe ayuntamiendo de Pamplona*, 2016.
- [14] Yeregui Elkarte.
- [15] J. Garmendia Larrañaga, "Euskal esku-langintza", *Eusko ikaskuntza*, Donostia, 1970.
- [16] J.J. Arazuri, "Calles de Pamplona. Plaza Consistorial", *PREGÓN*, no.113, 1979.
- [17] H. Jendritzki, "La reparación de las péndolas antiguas", *SCRIPTAR SA*, 1985.

- [18] T. Echaniz Iriarte, "Reestauracion y puesta en marcha de un reloj monumental de 1854", *Escuela universitaria politécnica de San Sebastian*, julio 2016.
- [19] J. Castells Garmendia, "Restauración no invasiva y puesta en marcha de reloj monumental", *Escuela universitaria politécnica de San Sebastian*, 2015.
- [20] R. López García, A.J. Cañabate López, R. Dorado Vicente, y G. Medina Sánchez, "Estudio histórico-tecnológico del carro que apunta al sur", *In XXI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, 412-419, 2004.
- [21] R. Villar-Ribera, F. Hernández-Abad, J.I. Rojas-Sola, y D. Hernández-Díaz, "Agustin de Betancourt's telegraph: Study and virtual reconstruction", *Mechanism and Machine Theory*, no.46, pp.820-830, 2011.

PLANOS



Restauración campana

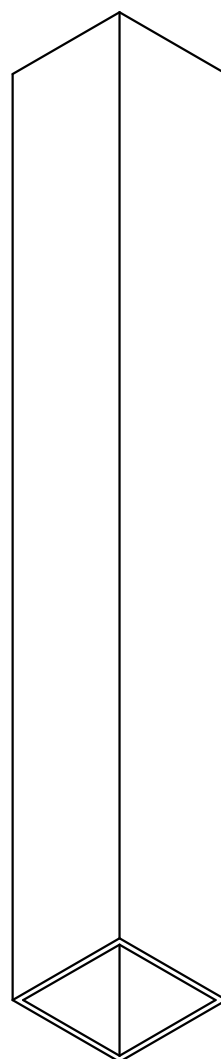
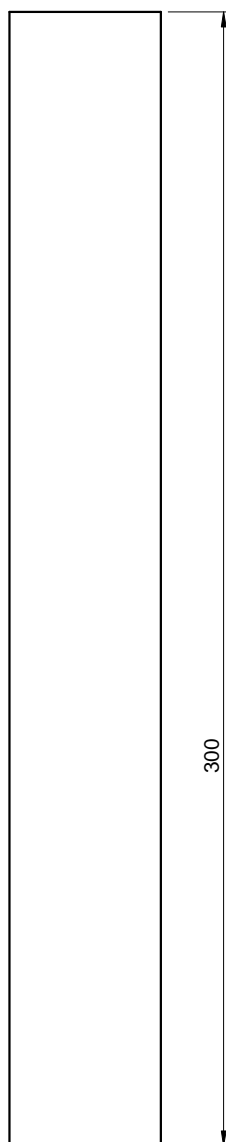
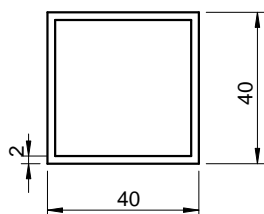
upna
 Universidad
 Pública de Navarra
 Nafarroako
 Unibertsitatea Puzifikua

CLAVER ALBA ADRIAN

SUJECCIÓN

Nº PLANO: 01

ESCALA:1:1



Restauración campana

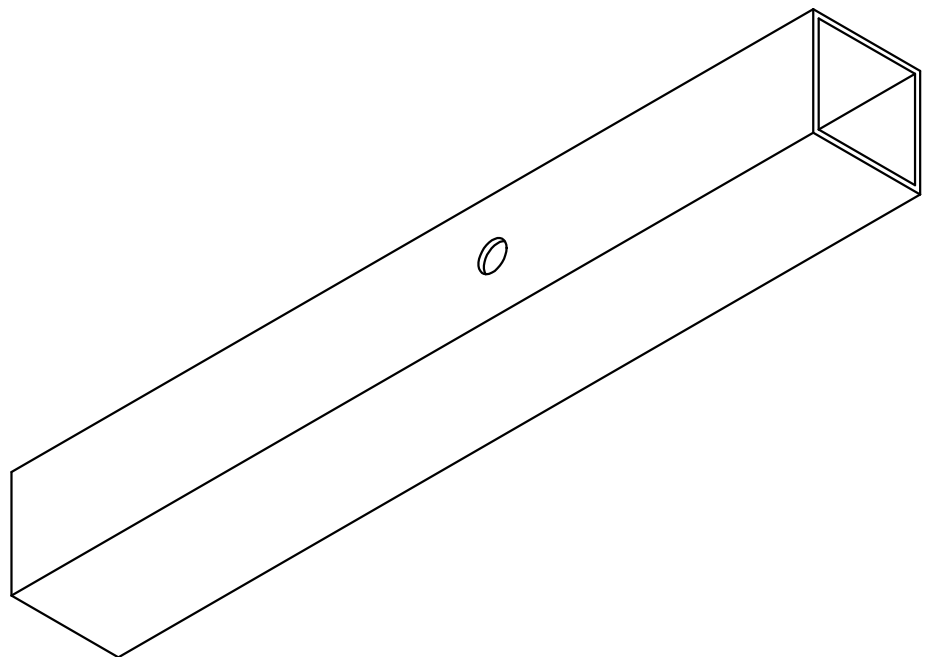
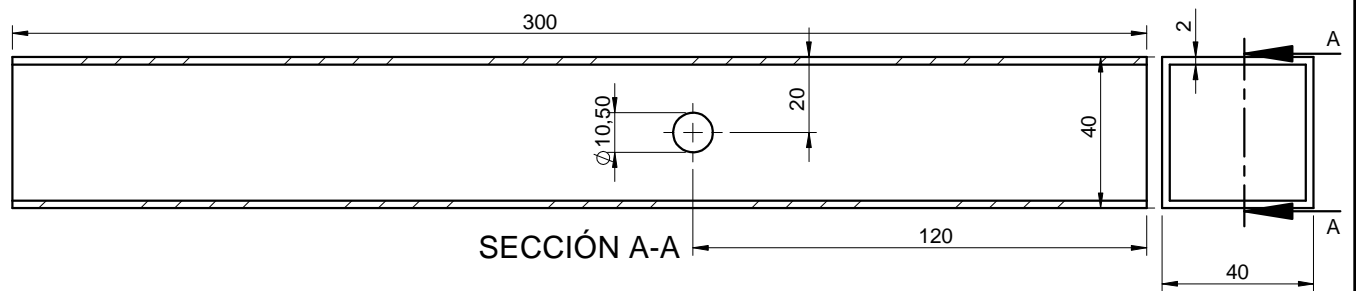
upna
Universidad
Pública de Navarra
Nafarroako
Unibertsitatea

CLAVER ALBA ADRIAN

BARRA VERTICAL ESTRUCTURA

Nº PLANO: 02

ESCALA:1:2



Restauración campana

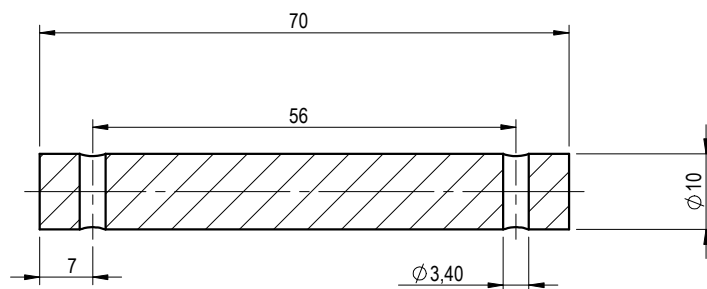
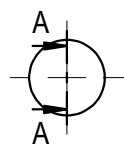
upna
 Universidad
 Pública de Navarra
 Nafarroako
 Unibertsitatea Puzifikua

CLAVER ALBA ADRIAN

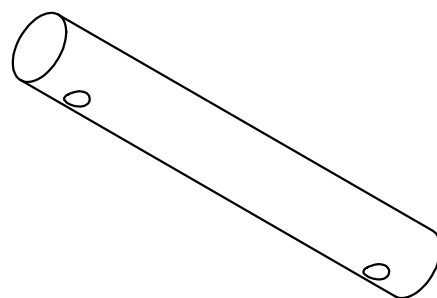
BARRA HORIZONTAL ESTRUCTURA

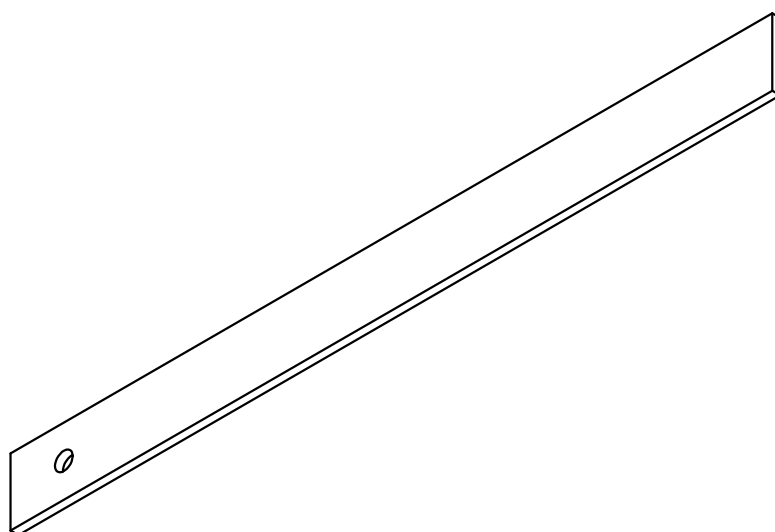
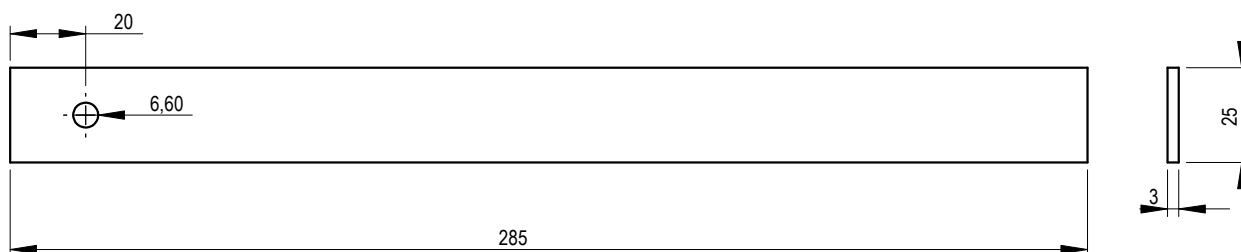
Nº PLANO: 03

ESCALA:1:2



SECCIÓN A-A





Restauración campana

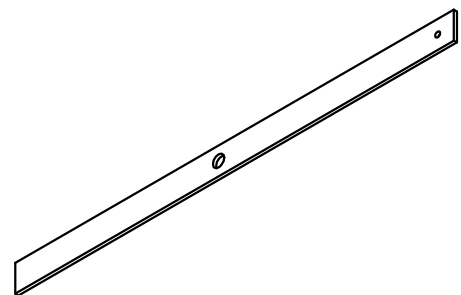
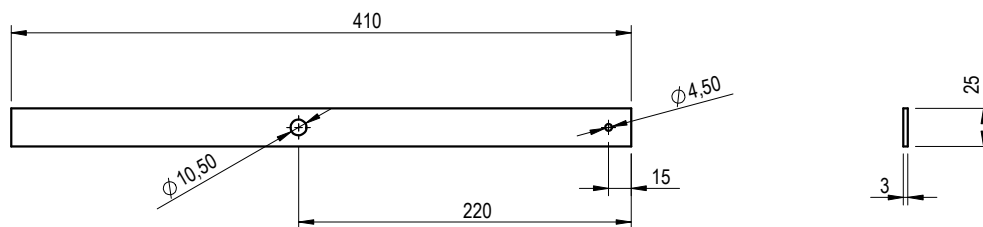
upna
 Universidad
 Pública de Navarra
 Nafarroako
 Unibertsitatea

CLAVER ALBA ADRIAN

ACTUADOR VERTICAL

Nº PLANO: 05

ESCALA:1:2



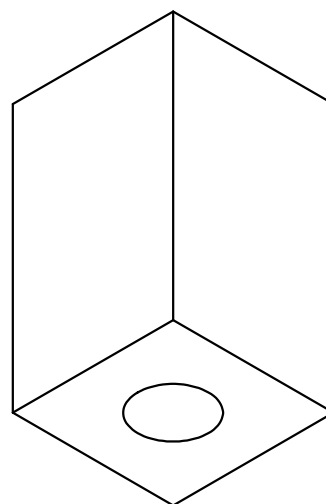
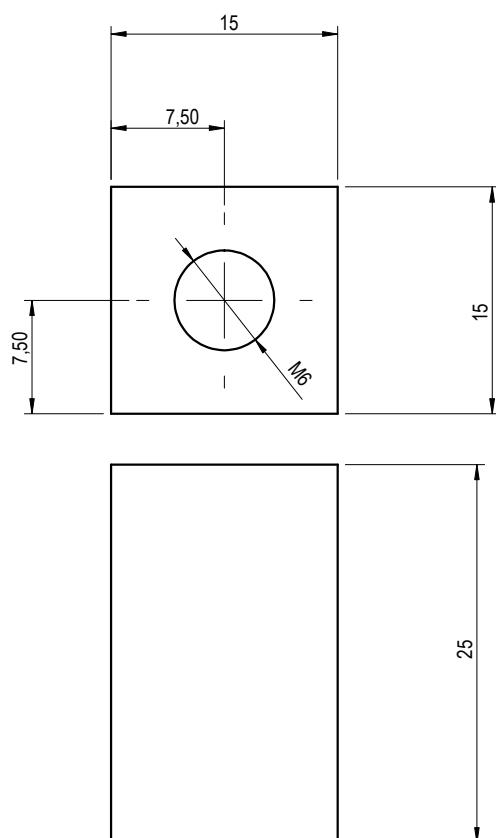
Restauración campana

upna
 Universidad
 Pública de Navarra
 Nafarroako
 Unibertsitatea Puñstikua

CLAVIER ALBA ADRIAN
 ACTUADOR HORIZONTAL

Nº PIEZA: 06

ESCALA:1:5



Restauración campana

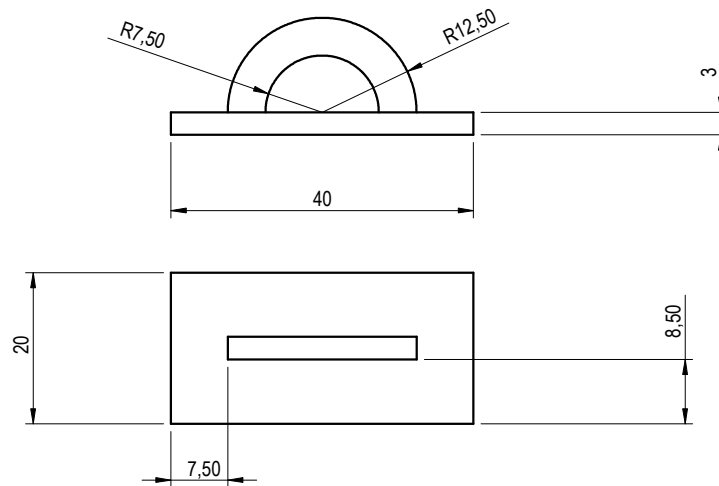
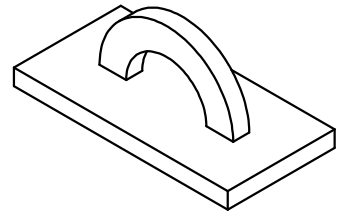
upna
 Universidad
 Pública de Navarra
 Nafarroako
 Unibertsitatea Puzosikua

CLAVER ALBA ADRIAN

BLOQUE ACTUADORES

Nº PLANO: 07

ESCALA:2:1



Restauración campana

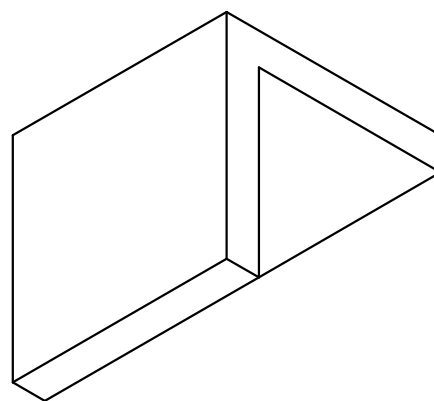
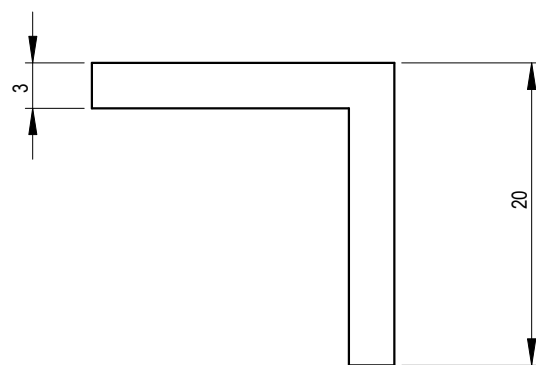
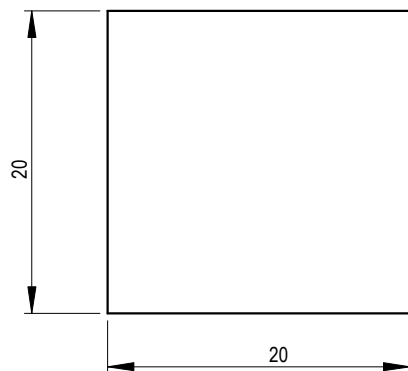
upna
 Universidad
 Pública de Navarra
 Nafarroako
 Unibertsitatea Puholikua

CLAVER ALBA ADRIAN

GANCHO

Nº PLANO: 08

ESCALA:1:1



Restauración campana

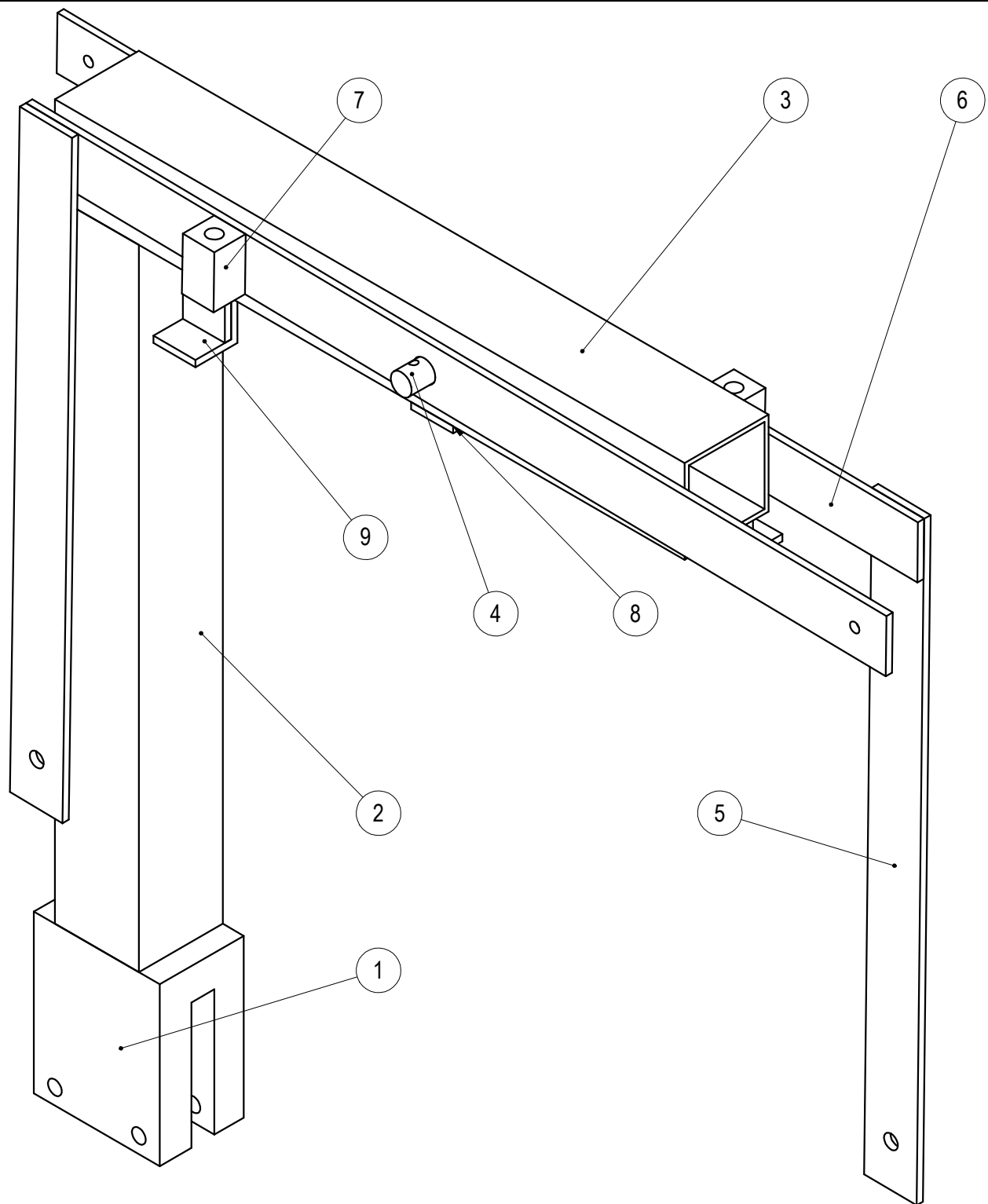
upna
 Universidad
 Pública de Navarra
 Nafarroako
 Unibertsitatea Puzifikua

CLAVER ALBA ADRIAN

PERFIL

Nº PLANO: 09

ESCALA:2:1



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PLANO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	01	SUJECCIÓN	1
2	02	BARRA VERTICAL SOPORTE	1
3	03	BARRA HORIZONTAL SOPORTE	1
4	04	EJE ACTUADORES	1
5	05	ACTUADOR VERTICAL	2
6	06	ACTUADOR HORIZONTAL	2
7	07	BLOQUE ACTUADORES	2
8	08	GANCHO	1
9	09	PERFIL	4

Restauración campana

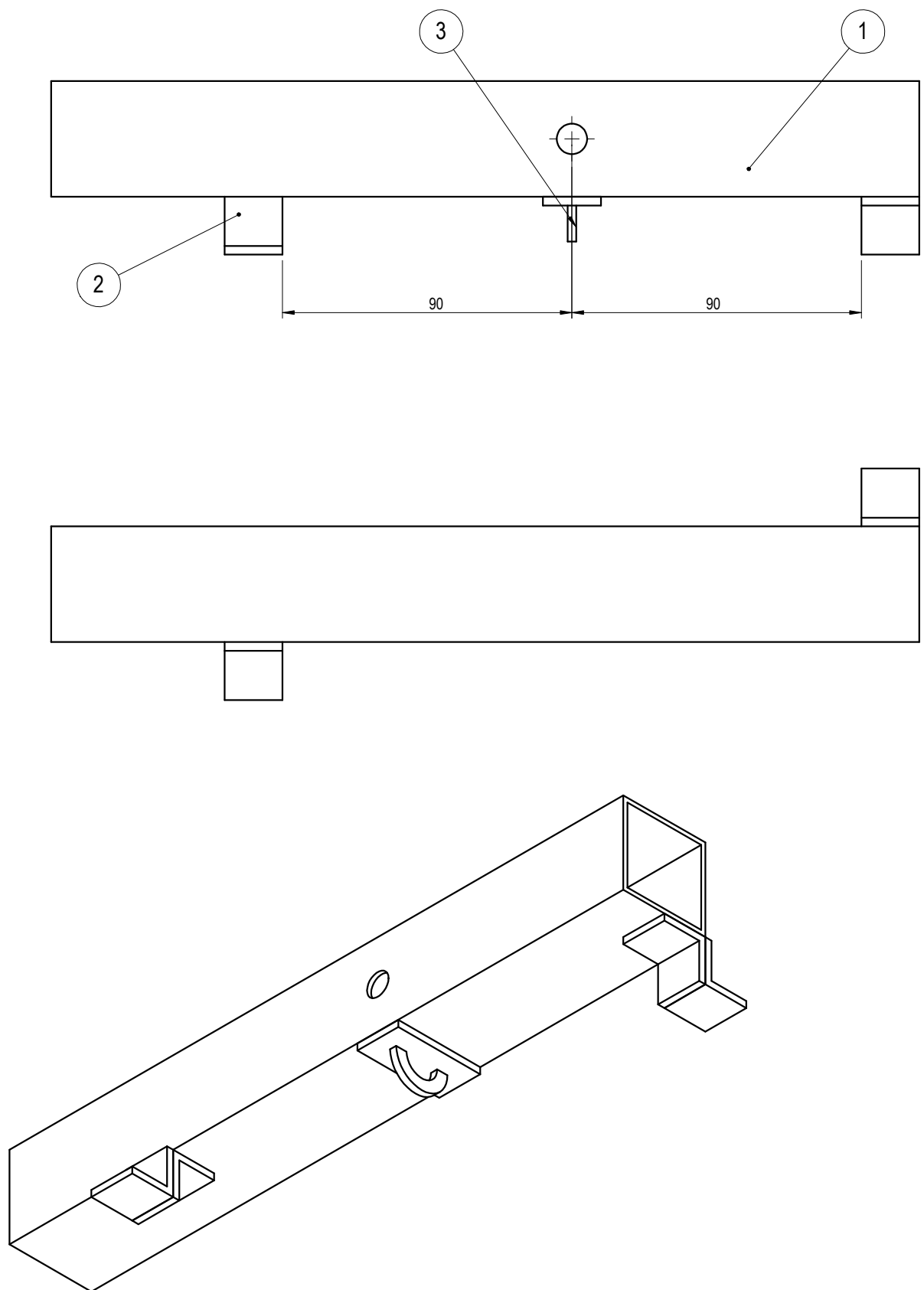
upna
 Universidad
 Pública de Navarra
 Nafarroako
 Unibertsitatea Puzifikua

CLAVER ALBA ADRIAN

SOPORTE SISTEMA DE CAMPANA

Nº PLANO: 10

ESCALA 1:2



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PLANO	CANTIDAD
1	03	1
2	09	4
3	08	1

Restauración campana

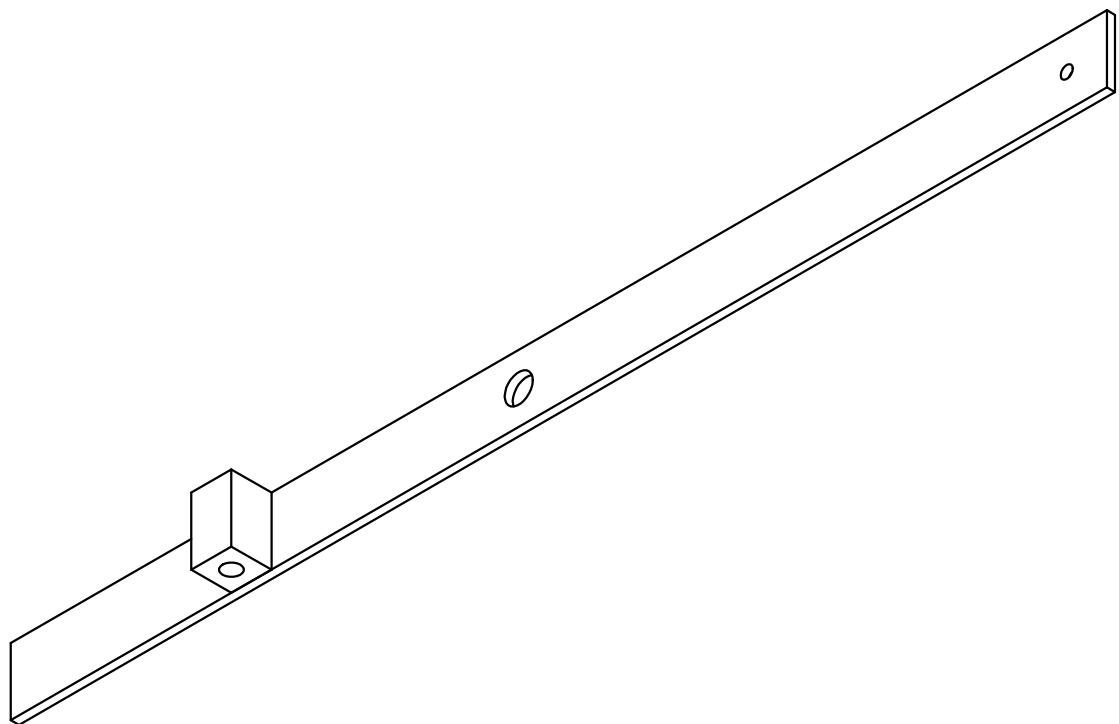
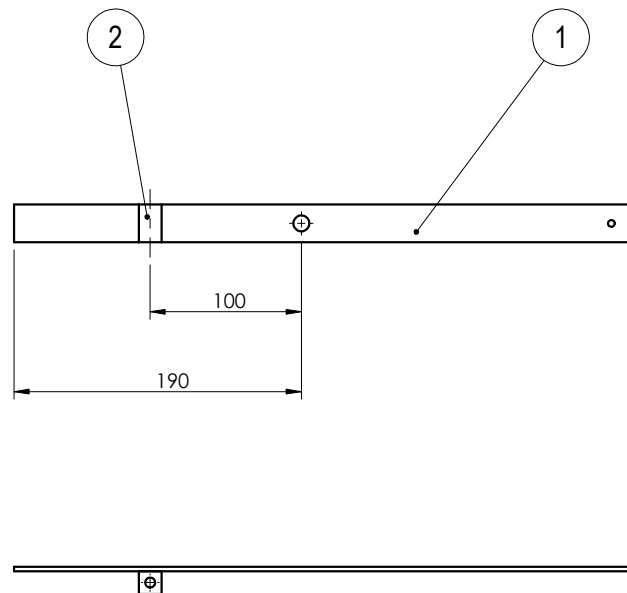
upna
 Universidad
 Pública de Navarra
 Nafarroako
 Unibertsitatea Puzifikoa

CLAVER ALBA ADRIAN

SOLDADURA PERFILES Y GANCHO

Nº PLANO: **11**

ESCALA: 1:2



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PLANO	CANTIDAD
1	06	1
2	07	1

Restauración campana

upna
 Universidad
 Pública de Navarra
 Nafarroako
 Unibertsitatea Puzifikoa

CLAVER ALBA ADRIAN
 SOLDADURA BLOQUES

Nº PLANO: 12

ESCALA:1:5